

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV  
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

TEPLÁRENSKÉ SÍTĚ  
PIPING SYSTEMS FOR DISTRICT HEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

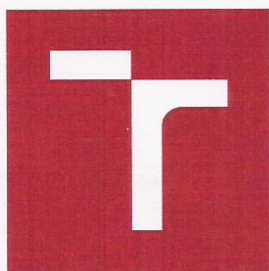
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Tomáš Malach

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HIRŠ, CSc.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3608T001 Pozemní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav technických zařízení budov

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Tomáš Malach
<b>Název</b>	Teplárenské sítě
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

1. Technické podklady k zadané budově
2. Aktuální legislativa ČR a EU
3. České i zahraniční technické normy
4. Odborná literatura
5. Zdroje na internetu

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce bude zpracována v souladu s platnými předpisy (zákony a vyhláškami, normami) pro zásobování budov teplem a systémy TZB.

### A. Analýza tématu, cíle a metody řešení

Analýza zadaného tématu, normové a legislativní podklady

Cíl práce, zvolené metody řešení

Aktuální technická řešení v praxi

Teoretické řešení (s využitím fyzikální podstaty dějů)

Experimentální řešení (popis metody a přístrojové techniky)

Řešení využívající výpočetní techniku a modelování

### B. Aplikace tématu na zadané budově

Zhodnocení stávajícího stavu rozvodů v zadané lokalitě, zhodnocení provozních stavů, návrh opatření pro zajištění kvality dodávky tepla do budovy, analýza užití energie z vybraných obnovitelných zdrojů, provozní schéma.

Výkresová dokumentace a grafické zpracování výstupů experimentálních měření.

### C. Experimentální řešení a počítačová simulace

Modelové dílčí řešení s využitím softwaru postihující zadanou problematiku. Hydraulika a dimenzování potrubních systémů tepelného zásobování.

Vše bude svázáno pevnou vazbou. Volné dokumenty (metadata, posudky, výsledky obhajoby) budou vloženy do kapsy na předních deskách, výkresy budou poskládány a uloženy jako příloha v kapse na zadní straně desek.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



---

doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se v první části zabývá obecným úvodem do soustav centralizovaného zásobování teplem a hydraulickým výpočtem pro teplovodní tepelnou síť. V další části je provedena analýza provozu zadané teplovodní tepelné sítě a jsou sestaveny tlakové diagramy pro jednotlivá roční období. Následně jsou zobrazeny tepelně - hydraulické charakteristiky pro hydraulicky hlavní větev (porovnání ručního výpočtu s výpočtem pomocí softwaru) a také jsou zobrazeny vybrané tepelně - hydraulické charakteristiky pro celou teplovodní tepelnou síť. Poslední část je zaměřena na stanovení množství dodaného tepla na základě měření ultrazvukovým průtokoměrem a příložených teplotních sond. Dále je provedena počítačová simulace, jejímž cílem je přiblížit se reálné dodávce tepla ze zdroje tepla na řešené tepelné síti v zimním období.

## **ABSTRACT**

In the first part of master thesis is presented general introduction to district heating system (DHS) and hydraulic calculation for DHS. The next part deals with analysis operation of DHS and the pressure diagram for certain time interval. Subsequently, the thermohydraulic characteristics for the hydraulic main branch (comparing manual calculation with software calculation) and also the selected thermal and hydraulic characteristics for the whole DHS are shown. The last part is focused on the determination of the amount of heat supplied based on the ultrasonic flowmeter and the temperature probes. Subsequently, the computer simulation is also carried out, aiming at approximating the real heat supply from heat source to solved thermal network in winter.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Soustava centralizovaného zásobování teplem, zdroj tepla, předávací stanice, hydraulika, tlakový diagram, dodávka tepla, ultrazvukový průtokoměr

## **KEYWORDS**

District heating system, heat source, transfer station, hydraulics, pressure diagram, heat supply, ultrasonic flowmeter



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Tomáš Malach *Teplárenské sítě*. Brno, 2017. 130 s., 15 s. příl. Diplomová práce.  
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov.  
Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.

## PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12.1. 2018

---

Bc. Tomáš Malach  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Velké poděkování patří vedoucímu méj diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Hiršovi, CSc. Další poděkování patří členům pracovní skupiny WP - 3 - Inteligentní sítě topení / chlazení, distribuční systém pro účinnou, ekologicky šetrnou, udržitelnou a spolehlivou dodávku energie v regionu za poskytnutí dat v rámci projektu Inteligentní regiony (číslo projektu TE02000077). Děkuji také celé méj rodině za podporu při mém studiu na VUT v Brně - Fakultě stavební.

# OBSAH

ÚVOD.....	10
A. ANALÝZA TÉMATU.....	11
A.1 SOUSTAVA CENTRALIZOVANÉHO ZÁSOBOVÁNÍ TEPEM (SCZT).....	12
A.2 PRINCIP SCZT .....	12
A.3 ČÁSTI SCZT .....	14
A.3.1 ZDROJ TEPLA.....	14
A.3.2 TEPELNÉ SÍTĚ .....	15
A.3.3 PŘEDÁVACÍ STANICE .....	21
A.4 HYDRAULICKÝ VÝPOČET TEPELOVODNÍ TEPELNÉ SÍTĚ.....	25
A.4.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI TEPLONOSNÉ LÁTKY - VODY .....	25
A.4.2 STANOVENÍ PŘÍPOJNÉHO TEPELNÉHO VÝKONU .....	30
A.4.3 STANOVENÍ HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKU V POTRUBÍ.....	31
A.4.4 STANOVENÍ OBJEMOVÉHO PRŮTOKU V POTRUBÍ.....	32
A.4.5 ROVNICE POHYBU KAPALIN.....	33
A.4.6 PROUDĚNÍ V POTRUBÍ.....	35
A.4.7 TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ .....	36
A.4.7.1 TLAKOVÉ ZTRÁTY TŘENÍM .....	37
A.4.7.2 TLAKOVÉ ZTRÁTY MÍSTNÍMI ODPORY .....	41
A.4.8 TLAKOVÝ DIAGRAM TEPELOVODNÍ TEPELNÉ SÍTĚ .....	42
B. APLIKACE TÉMATU .....	44
B.1 POPIS ŘEŠENÉ LOKALITY .....	45
B.2 CHARAKTERISTIKA PRINCIPU DODÁVKY TEPLA V ŘEŠENÉ LOKALITĚ .....	46
B.3 CHARAKTERISTIKA ZDROJE TEPLA, POTRUBNÍCH ROZVODŮ A ODBĚRNÝCH MÍST V ŘEŠENÉ LOKALITĚ .....	47
B.3.1 ZDROJ TEPLA - CENTRÁLNÍ VÝTOPNA KAMENNÝ VRCH (CVKV) .....	47
B.3.2 POTRUBNÍ ROZVODY .....	54
B.3.3 VÝMĚNÍKOVÉ STANICE.....	56
B.3.4 DOMOVNÍ PŘEDÁVACÍ STANICE (DPS) - TLAKOVĚ NEZÁVISLÁ.....	57
B.4 ANALÝZA PROVOZNÍCH STAVŮ TEPELNÉ SÍTĚ .....	60
B.4.1 ZIMNÍ PROVOZ (MĚSÍC LEDEN) .....	60
B.4.2 PŘECHODNÉ OBDOBÍ (MĚSÍC DUBEN).....	62
B.4.3 LETNÍ PROVOZ (MĚSÍC ČERVENEC) .....	63
B.4.4 ZÁVĚREČNÉ SROVNÁNÍ PROVOZNÍCH STAVŮ .....	65
B.5 MODEL TEPELNÉ SÍTĚ.....	66
B.5.1 ZADÁVANÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY (STACIONÁRNÍ VÝPOČET) .....	67
B.5.2 VYUŽÍVANÝ ZDROJ TEPLA .....	69
B.5.3 IDEALIZOVANÉ DIAGRAMY TRVÁNÍ .....	69
B.6 ZHODNOCENÍ TLAKOVÝCH DIAGRAMŮ TEPELOVODNÍ TEPELNÉ SÍTĚ.....	71
B.6.1 ŘEZ PRO ZIMU (-8 °C).....	73



B.6.2	ŘEZ PRO ZIMU (0 °C) .....	74
B.6.3	ŘEZ PRO LÉTO (20 °C) .....	75
B.6.4	ZÁVĚREČNÉ SROVNÁNÍ TLAKOVÝCH DIAGRAMŮ PRO JEDNOTLIVÉ ŘEZY ..	76
B.7	SROVNÁNÍ TEPELNĚ - HYDRAULICKÝCH VÝPOČTŮ .....	77
B.7.1	TEPELNÉ VÝPOČTY .....	77
B.7.2	HYDRAULICKÉ VÝPOČTY .....	83
B.8	GRAFICKÉ VÝSTUPY VYBRANÝCH TEPELNĚ - HYDRAULICKÝCH VELIČIN .....	87
C.	EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ A POČÍTAČOVÁ SIMULACE.....	92
C.1	EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ.....	93
C.1.1	POPIS METODY .....	93
C.1.1.1	STANOVENÍ OBJEMOVÉHO PRŮTOKU TEPLONOSNÉ LÁTKY ULTRAZVUKOVÝM PRŮTOKOMĚREM .....	94
C.1.1.2	STANOVENÍ TEPLoty TEPLONOSNÉ LÁTKY .....	95
C.1.1.3	STANOVENÍ VÝPOČTU DODANÉHO TEPLA .....	95
C.1.2	POPIS PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY .....	97
C.1.3	MĚŘENÍ A VÝPOČET .....	101
C.1.4	OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI VÝSLEDKU .....	106
C.2	POČÍTAČOVÁ SIMULACE .....	108
C.2.1	ROZDÍL MEZI STACIONÁRNÍM A DYNAMICKÝM VÝPOČTEM .....	108
C.2.2	OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO ZIMNÍ OBDOBÍ.....	108
C.2.3	KRITÉRIUM POSOUZENÍ PŘESNOSTI PREDIKCE .....	108
C.2.4	STANOVENÍ ROVNICE EKVITERMNÍ KŘIVKY ZDROJE TEPLA (CVKV).....	109
C.2.5	STANOVENÍ TEPLoty TEPLONOSNÉ LÁTKY NA VÝSTUPU ZE ZDROJE TEPLA 111	
C.2.6	DYNAMICKÝ VÝPOČET PREDIKCE.....	112
C.2.6.1	TÝDENNÍ PREDIKOVANÝ PRŮBĚH TEPLoty TEPLONOSNÉ LÁTKY NA VSTUPU DO ZDROJE TEPLA.....	117
C.2.6.2	TÝDENNÍ PREDIKOVANÝ PRŮBĚH OBJEMOVÉHO PRŮTOKU NA HRANICI ZDROJE TEPLA	118
C.2.6.3	TÝDENNÍ PREDIKOVANÝ PRŮBĚH TEPELNÉHO VÝKONU ZDROJE TEPLA.....	119
C.2.7	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ VÝSTUPŮ POČÍTAČOVÉ SIMULACE.....	119
	ZÁVĚR .....	120
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	121
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	124
	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ.....	127
	SEZNAM PŘÍLOH.....	130

# ÚVOD

Cílem diplomové práce je seznámení se soustavou centralizovaného zásobování teplem (SCZT), hydraulikou teplovodní tepelné sítě a následnou aplikací na zadané teplovodní tepelné síti. Práce je rozdělena do tří částí.

Analýza tématu - zabývá se obecným úvodem do řešeného tématu. Jedná se tedy o seznámení se soustavou centralizovaného zásobování teplem (SCZT). Dále je téma směřováno k hydraulice teplovodní tepelné sítě.

Aplikace tématu - je rozdělena na dvě části. První část se zabývá analýzou provozu řešené tepelné sítě a porovnáním tlakových diagramů za daných provozů (zimní a letní provoz). Druhá část je věnována tepelně - hydraulickému výpočtu zadané tepelné sítě pomocí použitého softwaru a výpočtu mému dle používaných vztahů. Výsledky jsou srovnány graficky. Následně jsou zobrazeny vybrané tepelně - hydraulické charakteristiky celé teplovodní tepelné sítě.

Experimentální řešení a počítačová simulace - v experimentálním řešení se zaměřuji na stanovení množství dodaného tepla na základě měření ultrazvukovým průtokoměrem a příložených teplotních sond. Cílem počítačové simulace je přiblížit se reálné dodávce tepla ze zdroje tepla na řešené tepelné síti v zimním období.



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV  
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

## A. ANALÝZA TÉMATU

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Tomáš Malach

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HIRŠ, CSc.

BRNO 2018

## A.1 Soustava centralizovaného zásobování teplem (SCZT)

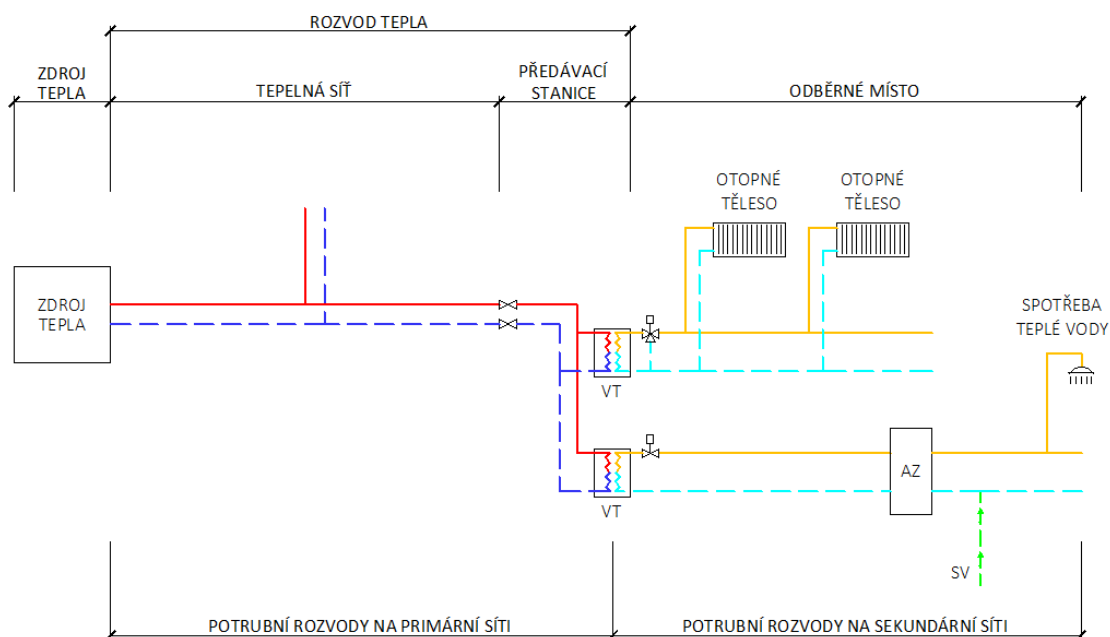
Tento způsob dodávky tepla k jednotlivým odběratelům je nejvíce rozšířen v oblastech, kde je velká hustota zástavby (ve velkých městech). Mezi odběratele patří především velké, ale i menší bytové domy, administrativní budovy, školy a průmyslové objekty. Při využívání SCZT dostává odběratel určitý komfort (nenastává situace, kdy by musel obsluhovat vlastní zdroj tepla). Jako další výhodu lze uvést to, že od zdroje tepla jde jeden vysoký komín, který škodí ve městě daleko méně, než kdyby byl komín u každého objektu, který potřebuje pro svůj provoz tepelnou energii. Také jsou daleko více hlídány emise obsažené ve spalinách, které při vysoké koncentraci zatěžují městskou zástavbu. Jako nevýhodu lze brát vysoké pořizovací náklady a vysoké náklady na rekonstrukci tepelných sítí.

## A.2 Princip SCZT

Soustava centralizovaného zásobování teplem je tvořená zdrojem tepla, tepelnými sítěmi, předávacími stanicemi a odběrnými místy (vnitřním zařízením včetně otopných těles apod.). [1]

Základem je tedy zdroj tepla, jehož požadovaný výkon je dán rozsahem zásobovaného území o určitém požadavku na potřebu tepla. Rozvody tepla nebo-li tepelná síť s předávacími stanicemi zajišťuje dopravu tepla od zdroje tepla k jednotlivým odběrným místům. Potrubní rozvody mezi zdrojem tepla a předávací stanicí (po výměník tepla) patří mezi primární síť. Potrubní rozvody od výměníku tepla až k odběrným místům patří mezi sekundární síť. Další důležitou částí celého systému je předávací stanice. Ta může být společná pro více objektů (např. pro více odběrných míst se stejným požadavkem na parametry teplonosné látky) nebo může mít každé odběrné místo svoji předávací stanici. Pokud je zdrojem tepla okružková či bloková kotelná, předávací stanice není potřeba, protože tyto zdroje tepla nepracují s vysokými teplotami teplonosné látky ani s vysokými tlaky. Grafické znázornění důležitých částí a rozdělení rozvodů tepla na primární a sekundární síť zobrazuje schéma na **Obr. 1**.





**Obr. 1** - Schéma dodávky tepla mezi zdrojem tepla a odběrným místem  
VT - výměník tepla, AZ - akumulční zásobník, SV - studená voda

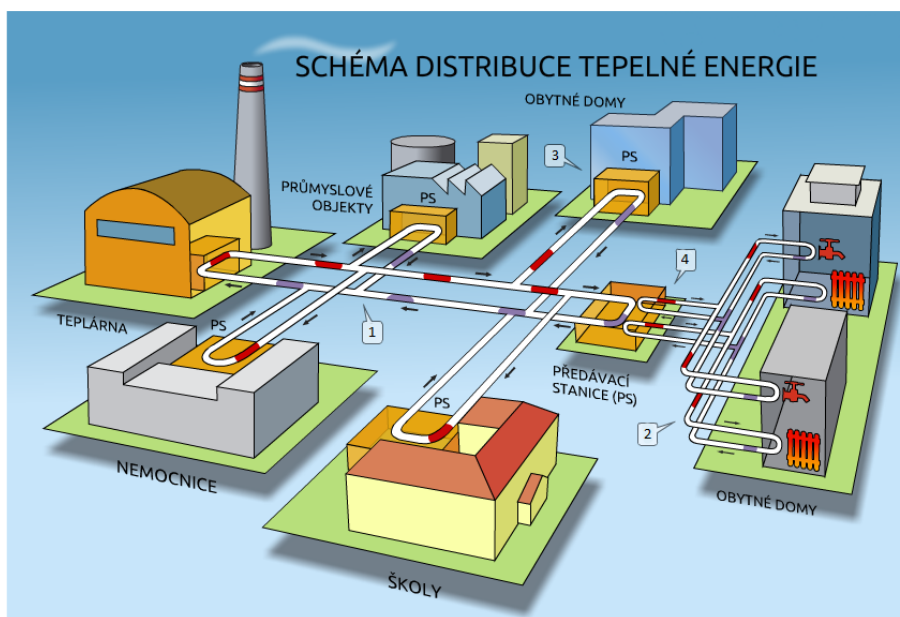
Pro představu jak SCZT může vypadat v reálné lokalitě interpretuje **Obr.2**, kde je zobrazena lokalita zásobovaná SCZT. Zdrojem tepla je v tomto případě teplárna.

ozn. č. 1 - primární rozvod tepla s teplotou látkou o vysoké teplotě a tlaku

ozn. č. 2 - sekundární rozvod tepla o požadované teplotě teploty látky pro vytápění a teplou vodu

ozn. č. 3 - předávací stanice určená pro jeden objekt (odběrné místo)

ozn. č. 4 - předávací stanice určená pro více objektů (odběrných míst)



**Obr. 2** - Schéma distribuce tepelné energie [2]

## A.3 Části SCZT

### A.3.1 Zdroj tepla

Výrobu tepla může zajišťovat kotelna, výtopna, teplárna nebo elektrárna. Od sebe se odlišují především svojí velikostí, způsobem výroby tepla a množstvím zásobovaných odběrných míst.

#### **Okrsková a bloková kotelna**

Tento zdroj tepla vyrábí pouze teplo a pracuje s nízkými tepelnými výkony (do několika MW). Jedná se o zdroj, který zásobuje více budov a který může být umístěn právě v jedné ze zásobovaných budov. Propojení mezi zdrojem tepla a odběrným místem není nutno zajistit přes předávací stanici. Jako palivo se dnes využívá zemní plyn (dříve uhlí). [3]

#### **Výtopna**

Vyrábí pouze teplo a pracuje s tepelnými výkony až do 35MW. Teplonosná látka o vyšší teplotě (voda) a tlaku (vodní pára). Tento zdroj tepla je samostatně stojící a zásobuje teplem více budov. Jako palivo se dnes využívá zemní plyn.[3]

#### **Teplárna**

Teplárny pracují s tepelnými výkony od 35MW a více. Jedná se o samostatně stojící objekt. V teplárně se současně vyrábí teplo i elektrická energie - KVET (kombinovaná výroba elektrické energie a tepla). [3]

#### **Elektrárna**

Během procesu výroby elektrické energie v tepelných a jaderných elektrárnách vzniká odpadní teplo. Tímto teplem lze zásobovat blízké lokality, kde bude efektivně využito. [3]

Z hlediska využití výkonu zdroje tepla v čase jej můžeme rozdělit na dva typy.

### **Základní zdroj tepla**

Zdroj tepla určený pro pokrytí základní části diagramu ročního trvání potřeby tepla. [1]

### **Špičkový zdroj tepla**

Zdroj tepla určený pro pokrytí špičkové části diagramu ročního trvání potřeby tepla.

Pracuje s nízkým ročním využitím instalovaného výkonu. [1]

## **A.3.2 Tepelné sítě**

Tepelnou sítí se rozumí potrubní rozvody, které zajišťují dodávku tepla pomocí teponosné látky od zdroje tepla k jednotlivým odběrným místům. Jejím cílem je také dopravit teponosnou látku k odběrným místům o požadovaných parametrech. [4]

Podle teponosné látky je možné tepelné sítě dělit na vodní a parní.

### **Vodní síť**

Teponosnou látkou je voda. Tuto síť je možné rozdělit na další dvě varianty a to je teplovod a horkovod. Rozdíl spočívá v teplotě teponosné látky (vody). U teplovodu je maximální teplota teponosné látky 110°C a u horkovodu se teplota teponosné látky pohybuje nad 110°C. Tlak u vodní sítě nesmí klesnout pod mez sytosti vodních par - došlo by k odpařování vody a vzniku vodní páry. Vodní pára by mohla způsobit v síti rázové jevy.

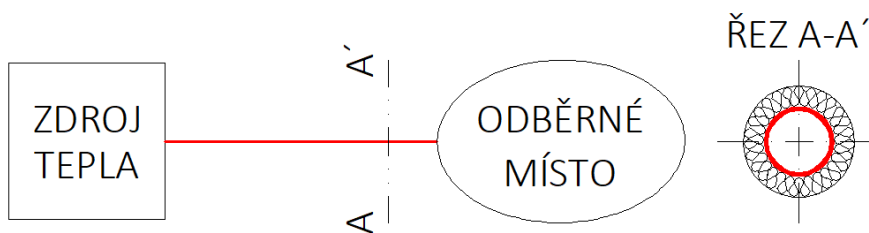
### **Parní síť**

Teponosnou látkou je vodní pára. Distribuční síť je označována jako parovod. Dle tlakových poměrů lze páru dělit na nízkotlakou (maximální přetlak činí 0,07 MPa), středotlakou (pára o maximálním přetlaku od 0,07 MPa do 1,6 MPa) a vysokotlakou (maximální přetlak je vyšší než 1,6 MPa). Nízkotlaká pára má například uplatnění ve starších systémech vytápění - především k přímému vytápění. Středotlaká pára je využívána k distribuci tepla ve městech nebo pro průmysl. Vysokotlaká pára je využívána především k výrobě elektrické energie nebo pro průmysl, kde je její využití pro technologické účely. [19]

Podle počtu trubek v primární síti lze tepelné sítě rozdělit na jednotrubkové, dvoutrubkové a třítubkové.

### **Jednotrubková síť**

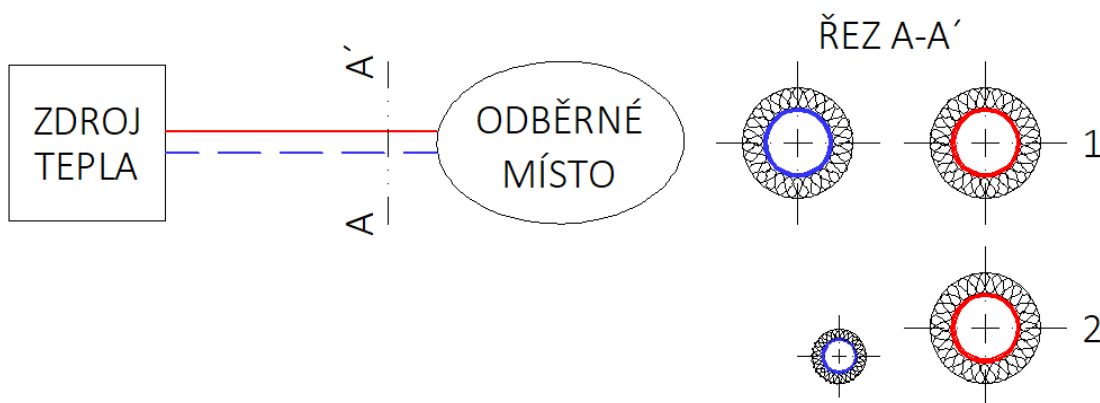
Její použití je v dnešní době minimální, využívá se tam, kde se teplotonosná látka nevrací zpět do zdroje tepla (např. u parních rozvodů bez vracení kondenzátu - využití páry v průmyslu). [4]



**Obr. 3** - Schéma jednotrubkové sítě

### **Dvoutrubková síť**

Jedná se o nejrozšířenější provedení. Tvoří ji přívodní a vratné potrubí. Pokud je teplotonosnou látkou voda, jsou průměry přívodního a vratného potrubí shodné a tepelně izolované. Jestliže je teplotonosnou látkou vodní pára izoluje se pouze potrubí s vodní párou. U parní sítě nese vratné potrubí označení jako kondenzátní. To není třeba izolovat, pouze v případě, že by mohlo dojít k jeho zamrznutí. Kondenzátní potrubí má menší průměr než parní - o třetinu až polovinu. Dvoutrubková síť umožňuje neustálou cirkulaci teplotonosné látky. [4]

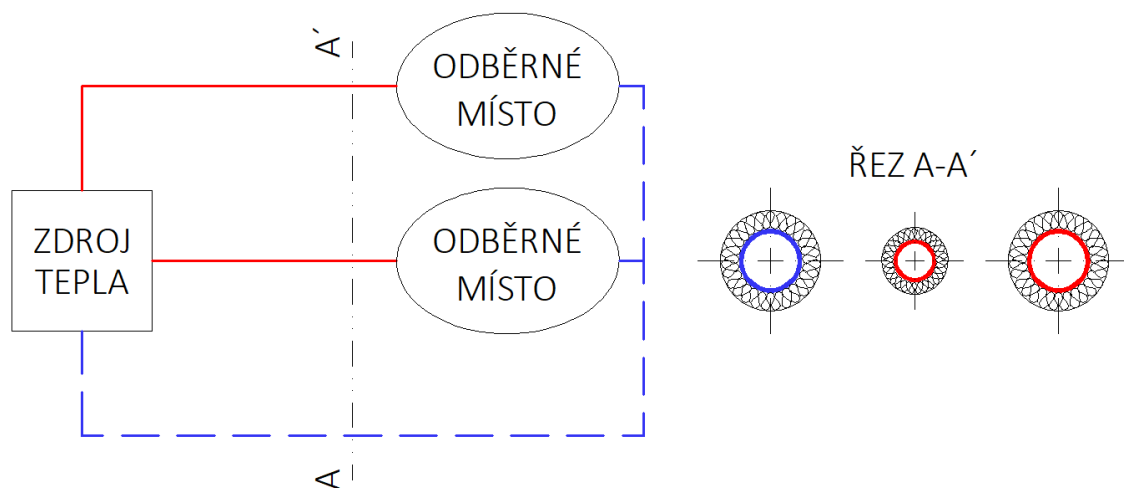


**Obr. 4** - Schéma dvoutrubkové sítě  
1 - vodní síť, 2 - parní síť



### **Třítrubková síť**

Její použití je jako u jednotrubkové sítě minimální. Od dvoutrubkové sítě se liší tím, že se v každém přívodním potrubí nachází teplotonosná látka s jinými parametry. Vratné potrubí mají společné. Při běžných podmínkách SCZT nemá tento druh uplatnění. [4]

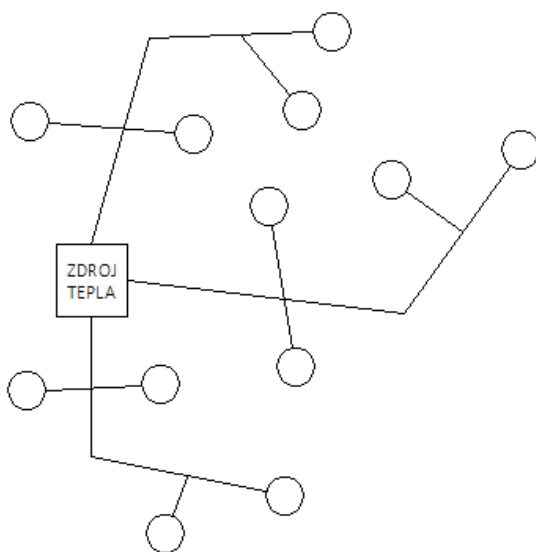


**Obr. 5** - Schéma třítrubkové sítě

Podle půdorysného uspořádání rozlišujeme síť paprskovité, okružní a mřížové.

### **Paprskovitá síť**

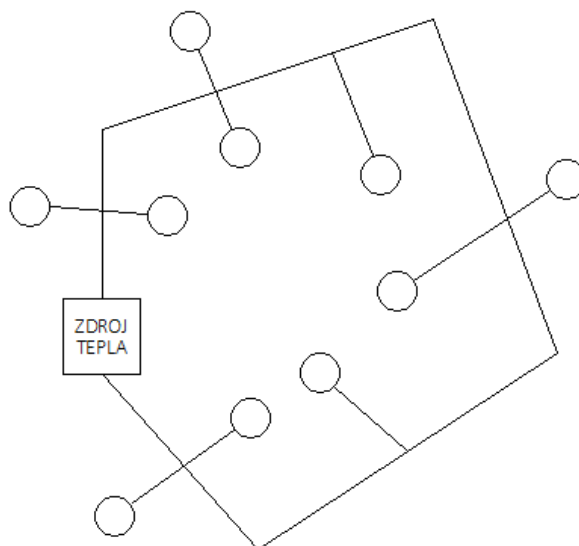
Jedná se o nejčastěji používanou síť. Ze zdroje tepla vychází jedna nebo více hlavních větví. Ty se dále dělí k jednotlivým odběrným místům s předávacími stanicemi.



**Obr. 6** - Paprskovitá síť[4]

### **Okružní síť**

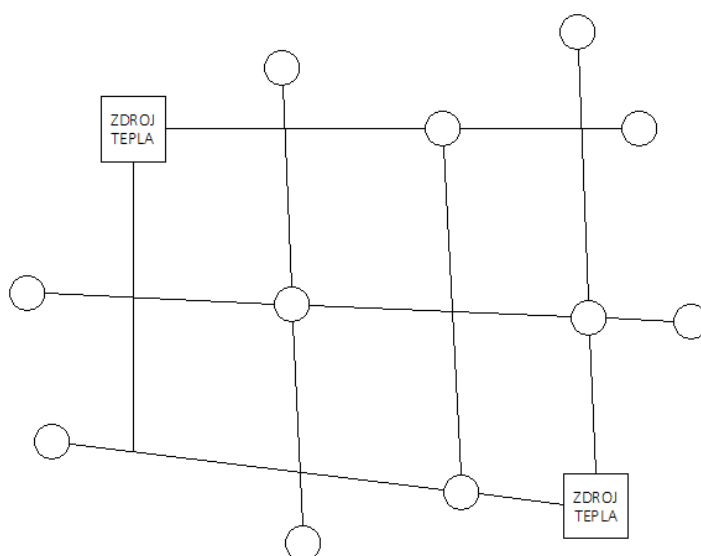
Je svým způsobem úpravou paprskovité sítě, kde jsou hlavní větve vzájemně propojeny. U vodní okružní sítě však mohou nastat při změnách provozních stavů problémy s dodávkou tepla k hydraulicky nejvzdálenějšímu spotřebiči. [4]



**Obr. 7 - Okružní síť [4]**

### **Mřížová síť**

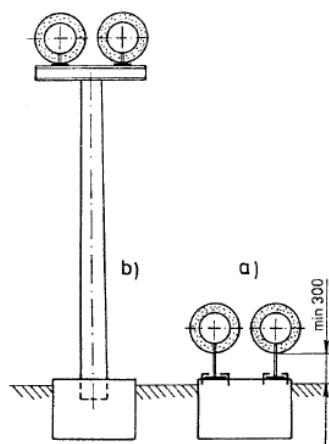
Tato síť se skládá z navzájem propojených okruhů, které jsou umístěny vedle sebe. Na síť může být napojeno více zdrojů tepla. Tento druh sítě se u tepelných rozvodů nevyužívá. Použití této sítě je vhodné u vodovodů či plynovodů. [4]



**Obr. 8 - Mřížová síť [4]**

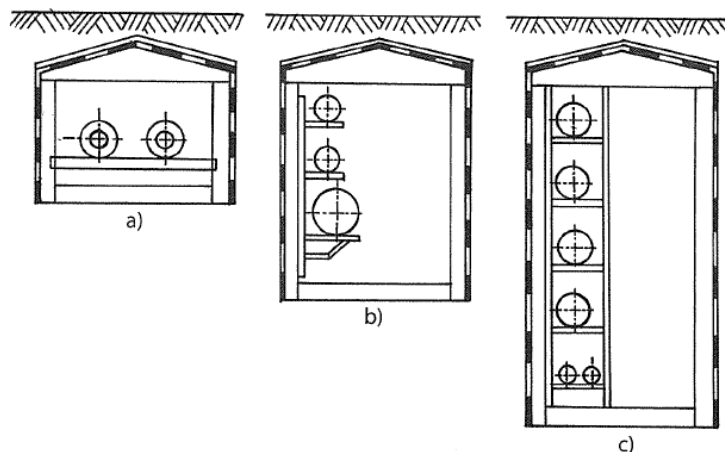
Poslední rozdělení sítí je podle způsobu uložení. Dělí se na vedení nadzemní, pozemní a podzemní. Do podzemního vedení spadá vedení v kanálech, kolektorech a v zemině.

Z hlediska investičních nákladů je nejvýhodnější pozemní vedení. Tato varianta není vhodná pro městskou zástavbu a to nejen z hlediska estetického, ale také technického. Nadzemní vedení také není z hlediska estetiky příliš vhodné pro městskou zástavbu. Investiční náklady jsou vyšší než u pozemního vedení. Tento způsob lze využít ve zvláštních případech jako je překonání vodních toků, pozemních komunikací a železnic. [4]



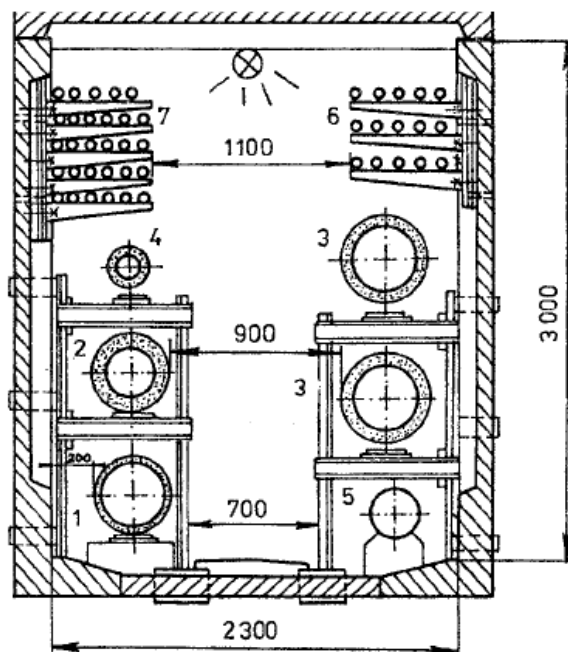
**Obr. 9** - Vedení potrubí[4]  
a - pozemní, b- nadzemní

Kanálové vedení spadá do pozemní varianty jak vést potrubní rozvody. Kanály se skládají ze železobetonových prefabrikovaných dílců. Existují tři druhy kanálů - neprůlezný (kanál o nejmenším rozměru), průlezný a průchozí (světla výška 2,1 m a volná průchozí šířka min. 0,6 m). [4]



**Obr. 10** - Tepelný kanál [5]  
a - neprůlezný, b - průlezný, c - průchozí

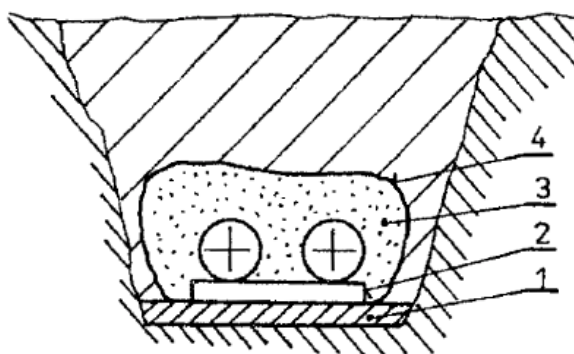
Další podzemní vedení je kolektorové. Slouží k rozvodům nejen tepelných potrubí, ale také ostatních sítí (např. silové kabely, vodovod, aj.). Jedná se o dražší variantu podzemního provedení. [4]



**Obr. 11** - Řez městským kolektorem [4]

1 - horkovodní potrubí - přívod, 2 - horkovodní potrubí - vrat, 3 - parovody, 4 - kondenzátní potrubí, 5 - vodovod, 6 - silové kabely, 7 - telefonní kabely

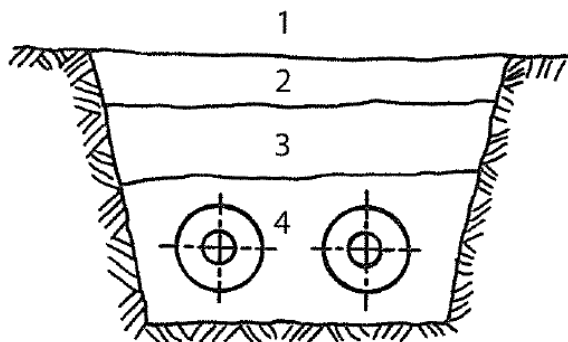
Posledním typem podzemního vedení je vedení v zemině. Potrubí je vedeno v ochranné trubce, v tepelně izolační zálivce nebo v hydrofobním zásypu. [4]



**Obr. 12** - Vedení potrubí v hydrofobním zásypu [4]

1- betonové dno výkopu, 2 - podložka z taveného čediče, 3 -hydrofobní tepelně izolační zásyp, 4 - ochranná fólie z PVC

V dnešní době se při rekonstrukci či při rozrůstání tepelné sítě používá potrubí s ochrannou trubkou z tvrzeného PVC a polyuretanovou tepelnou izolací nebo pružné předizolované potrubí. [4]



**Obr. 13** - Vedení předizolovaného potrubí [5]

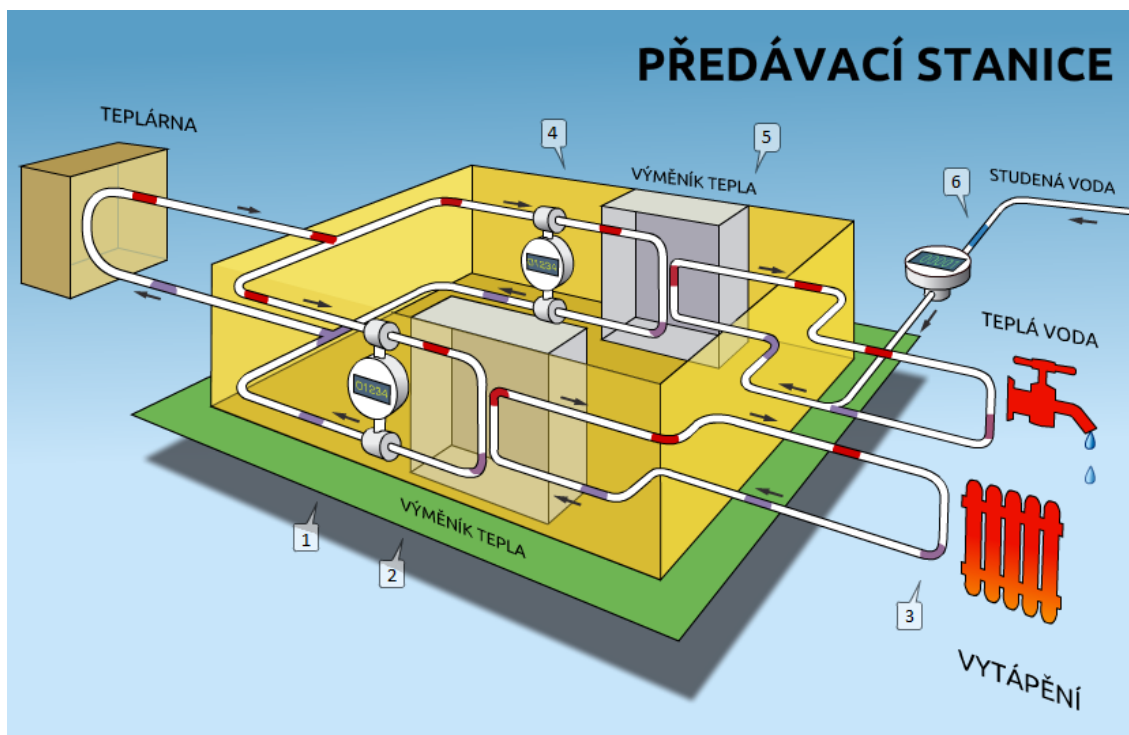
1 - upravený povrch, 2 - zemina, 3 - drobné kamenivo, 4 - jemný písek



**Obr. 14** - Předizolované potrubí [6]

### A.3.3 Předávací stanice

Někdy také označována jako výměňiková stanice či úpravna parametrů. Ve zdroji tepla se vyrábí pára nebo horká voda. Tyto dvě varianty teplonosné látky nemají požadované parametry pro vytápění nebo přípravu teplé vody. Právě předávací stanice slouží k propojení primární sítě se sítí sekundární a dochází v ní k úpravě parametrů teplonosné látky. Teplonosná látka v primární síti má vysokou teplotu nebo vysokou teplotu a tlak. Předávací stanice upraví parametry teplonosné látky tak, aby měla v sekundární síti teplotu dle požadavku vnitřního zařízení (vytápění, příprava teplé vody) v odběrném místě. [5]



Obr. 15 - Schéma předávací stanice [7]

Na Obr. 15 je schematicky znázorněn princip předávací stanice. Tento typ obsahuje dva výměníky tepla a to pro vytápění a přípravu teplé vody. Oba okruhy jsou vybaveny měřičem tepla (ozn. č. 1 a ozn. č. 4), které plní funkci měření spotřebované tepelné energie zvlášť pro vytápění a přípravu teplé vody. Přenos tepla mezi primární a sekundární sítí je zajištěn přes teplosměnnou plochu výměníku tepla (ozn. č. 2 pro vytápění a ozn. č. 5 pro přípravu teplé vody). V sekundární síti pro vytápění (ozn. č. 3) cirkuluje upravená teplá voda - nepitná. Na sekundární síť pro přípravu teplé vody je přes vratné potrubí připojeno potrubí se studenou vodou (ozn. č. 6) pro doplňování vody do okruhu. Součástí potrubí s přívodem studené vody je vodoměr, který měří množství doplňované studené vody.

Dělení předávacích stanic dle teplotnosné látky v primární a sekundární síti je uvedeno v Tab.1.

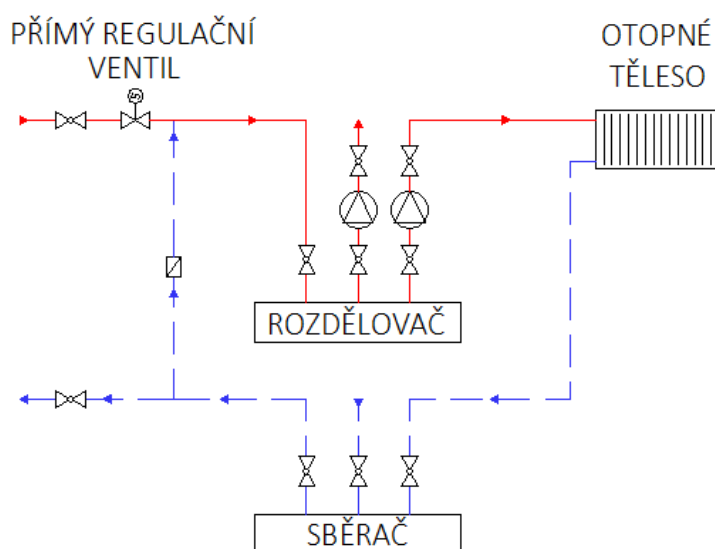
Teplotnosná látka	
Primární síť	Sekundární síť
pára	pára
pára	voda
voda	pára
voda	voda

Tab. 1 - Teplotnosné látky v primární a sekundární síti

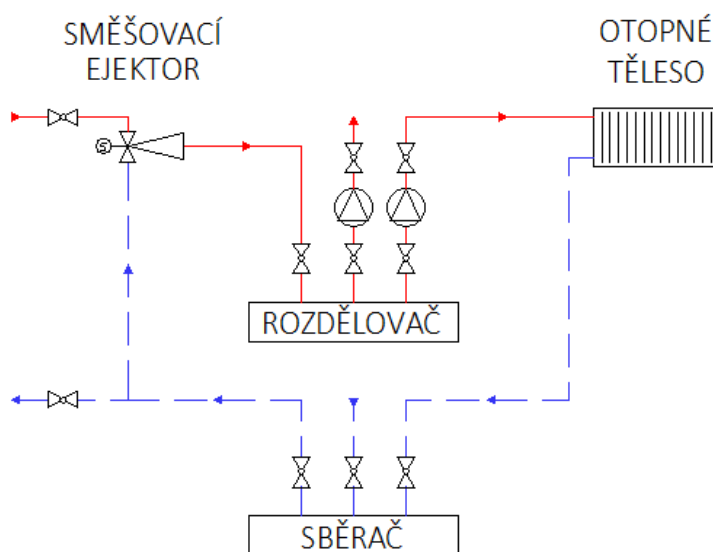
Dále je možné předávací stanice rozdělit dle vazby tlaku mezi teplotonosnou látkou v primární a sekundární síti na tlakově závislé (přímé) a tlakově nezávislé (nepřímé).

### **Předávací stanice tlakově závislé (přímé)**

Parametry teplotonosné látky se upravují na požadované parametry vnitřního zařízení pomocí směšovacích čerpadel, směšovacích ejektorů, regulačních ventilů apod.). Změna skupenství teplotonosné látky je v tomto typu předávací stanice nemožná. [8]



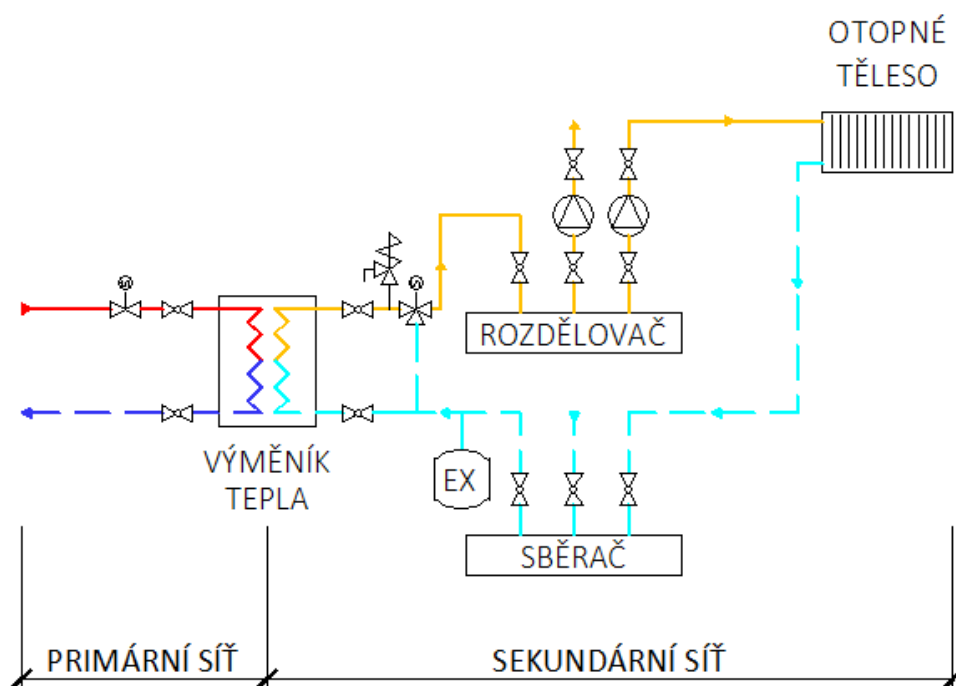
**Obr. 16** - Zjednodušené schéma tlakově závislé předávací stanice pro vytápění (voda - voda) s přímým regulačním ventilem [20]



**Obr. 17** - Zjednodušené schéma tlakově závislé předávací stanice pro vytápění (voda - voda) se směšovacím ejektorem [20]

### **Předávací stanice tlakově nezávislé (nepřímé)**

Přenos tepla z primární sítě do sekundární sítě je zajištěn přes výměník tepla. Primární a sekundární síť je od sebe tlakově oddělena - nejsou na sobě tlakově ani hydraulicky závislé. Tento typ předávací stanice umožňuje změnu skupenství teplotonosné látky. Tlak v sekundární síti je udržován pomocí vlastního zabezpečovacího zařízení. [9]



**Obr. 18** - Zjednodušené schéma tlakově nezávislé předávací stanice pro vytápění (voda - voda)



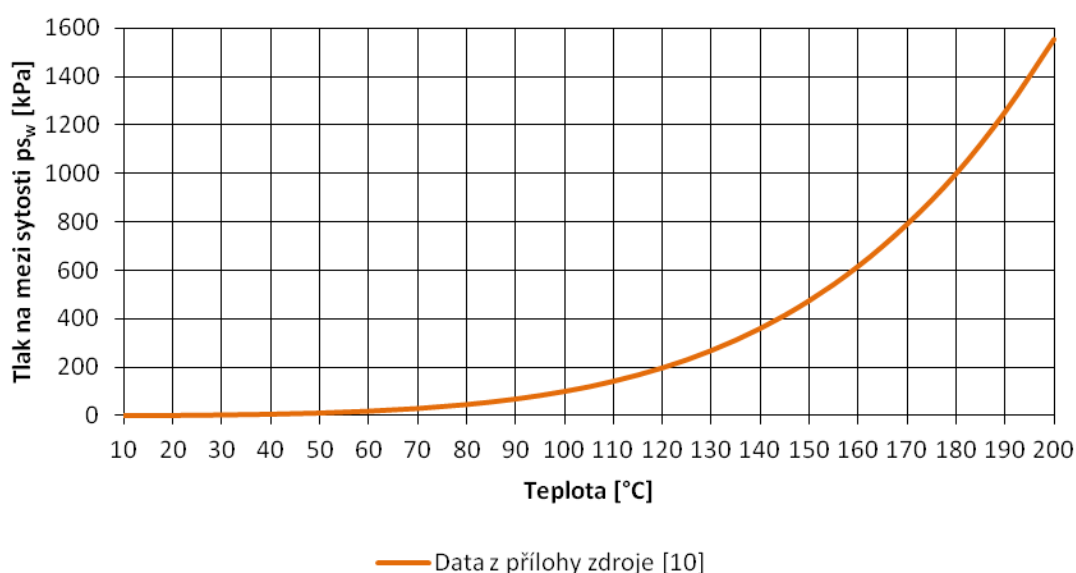
## A.4 Hydraulický výpočet teplovodní tepelné sítě

### A.4.1 Základní fyzikální vlastnosti teplotnosné látky - vody

Z hlediska hydrauliky má každá teplotnosná látka své charakteristické fyzikální veličiny. Voda jako teplotnosná látka má následující charakteristické fyzikální veličiny.

#### Tlak na mezi sytosti

Ke každé teplotě vody je přiřazen tlak na mezi sytosti. Pokud dojde k poklesu pod tento tlak, nastane změna skupenství - z kapalného se stává plynné (voda - vodní pára). Závislost teploty a tlaku na mezi sytosti zobrazuje **Graf 1**.



**Graf 1** - Tlak na mezi sytosti vody v závislosti na její teplotě

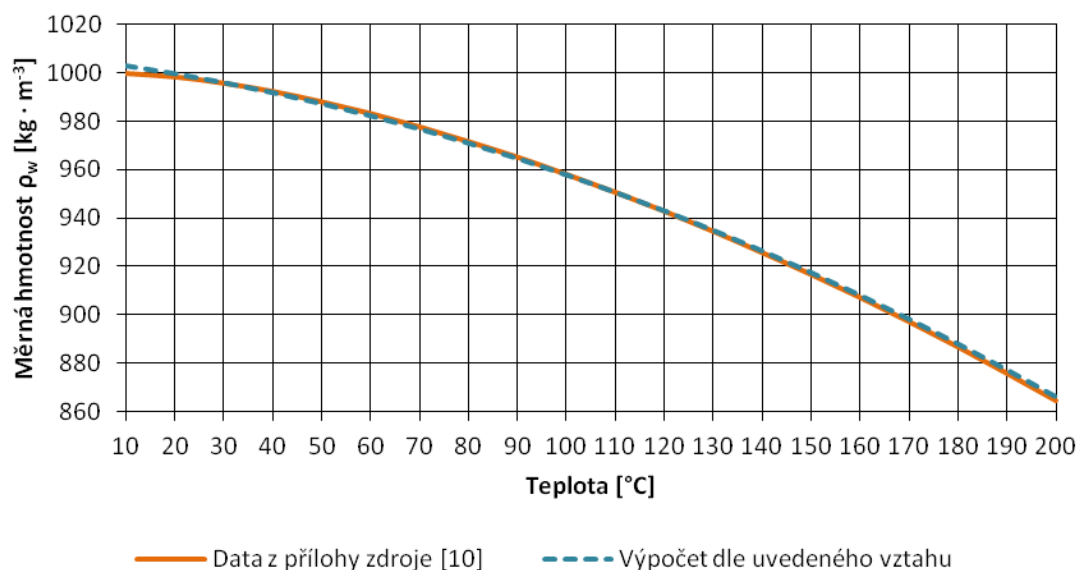
#### Měrná hmotnost

Udává hmotnost objemové jednotky. Mění se při změně teploty a tlaku. Se zvyšující se teplotou měrná hmotnost klesá. V praktických výpočtech se uvažuje s měrnou hmotností vody  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pokud se však navrhují okruhy pro vytápění nebo přípravu teplé vody musí se uvažovat vliv teploty. [10] Při známé teplotě vody můžeme stanovit její měrnou hmotnost dle vztahu (1.1), který však platí pro interval teplot od  $10 \text{ °C}$  až do  $200 \text{ °C}$ . [11]

$$\rho_w = 1006 - 0,26 \cdot t_w - 0,0022 \cdot t_w^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.1)$$

$t_w$                       teplota vody [°C]

Závislost měrné hmotnosti vody na její teplotě při tlaku nasycení zobrazuje **Graf 2**. Také je v něm porovnání výsledků z přílohy zdroje [10] s výpočtem dle vztahu (1.1).



**Graf 2** - Závislost měrné hmotnosti vody na její teplotě

### Měrná tepelná kapacita

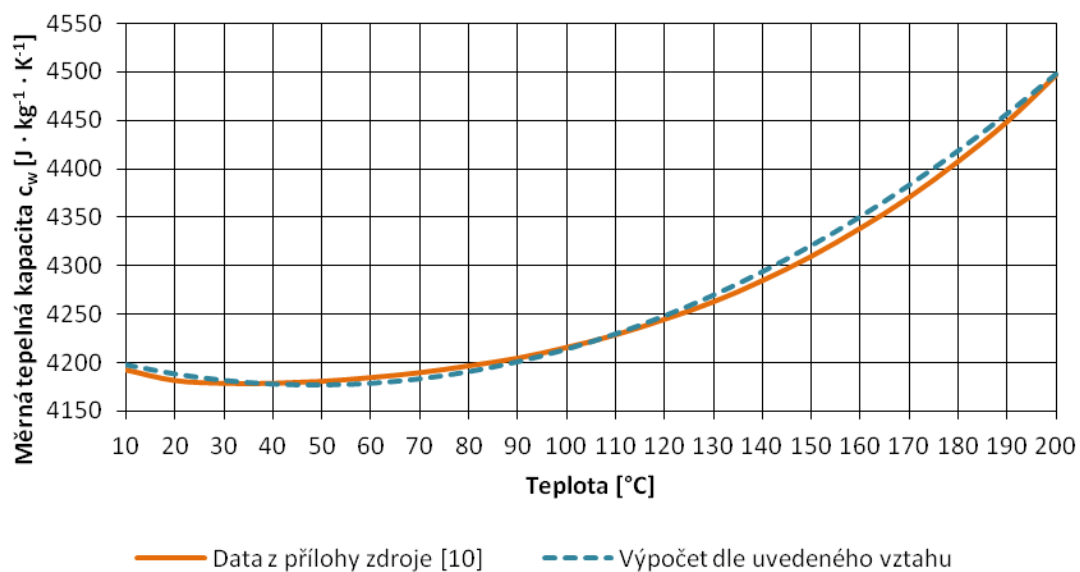
Měrná tepelná kapacita vody udává, jaké množství tepla je třeba dodat jednomu kilogramu vody, aby došlo k jejímu ohřátí o 1 K.

Početně ji lze stanovit dle vztahu (1.2). Tento vztah lze použít pro teplotu vody v intervalu od 0 °C až do 200 °C. [11]

$$c_w = (4210 - 1,363 \cdot t_w + 0,014 \cdot t_w^2) \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.2)$$

$t_w$                       teplota vody [°C]

Závislost měrné tepelné kapacity vody na její teplotě při tlaku nasycení zobrazuje **Graf 3**. Také je v něm porovnání výsledků z přílohy zdroje [10] s výpočtem dle vztahu (1.2).



**Graf 3** - Závislost měrné tepelné kapacity vody na její teplotě

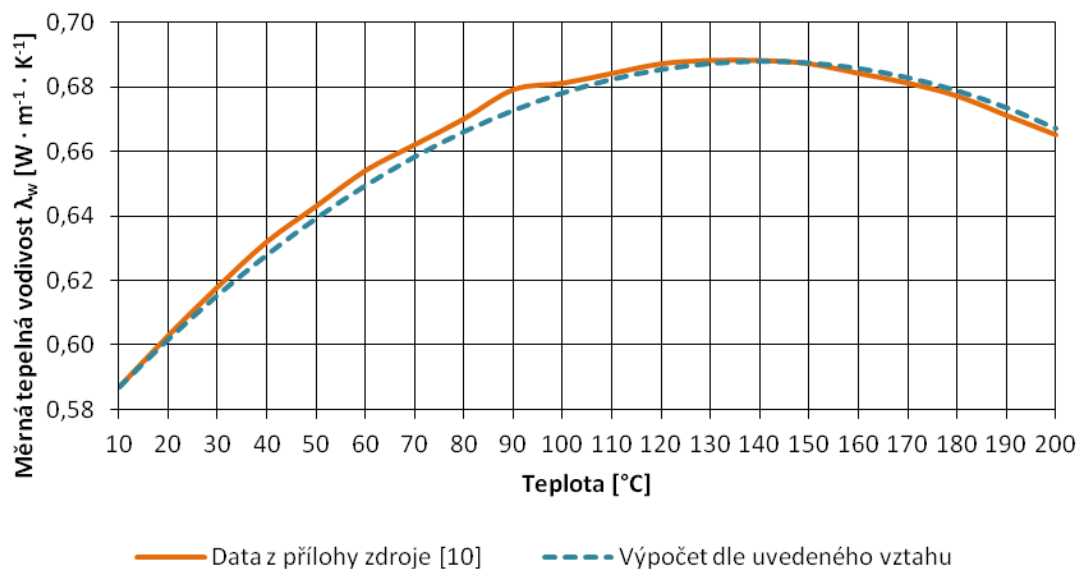
### Měrná tepelná vodivost

Udává schopnost vést teplo při dané teplotě vody. Početně ji lze stanovit dle vztahu (1.3). Tento vztah lze použít pro teplotu vody v intervalu od 10 °C až do 200 °C. [11]

$$\lambda_w = (0,571 + 0,00166 \cdot t_w - 0,0000059 \cdot t_w^2) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.3)$$

$t_w$                       teplota vody [°C]

Závislost měrné tepelné vodivosti vody na její teplotě při tlaku nasycení zobrazuje **Graf 4**. Také je v něm porovnání výsledků z přílohy zdroje [10] s výpočtem dle vztahu (1.3).



**Graf 4** - Závislost měrné tepelné vodivosti vody na její teplotě

### Viskozita

V kapalinách vznikají při vzájemném pohybu částic vlivem vnitřního tření (viskozity) smyková napětí. Se stoupající teplotou vody viskozita klesá. Viskozita se dělí na dynamickou a kinematickou. V hydraulice je při výpočtech využívána především kinematická viskozita. [12]

Početně lze dynamickou viskozitu vody při teplotě od 10 °C do 40 °C stanovit dle vztahu (1.4) a pro teplotu vody od 45 °C do 200 °C dle vztahu (1.5). [11]

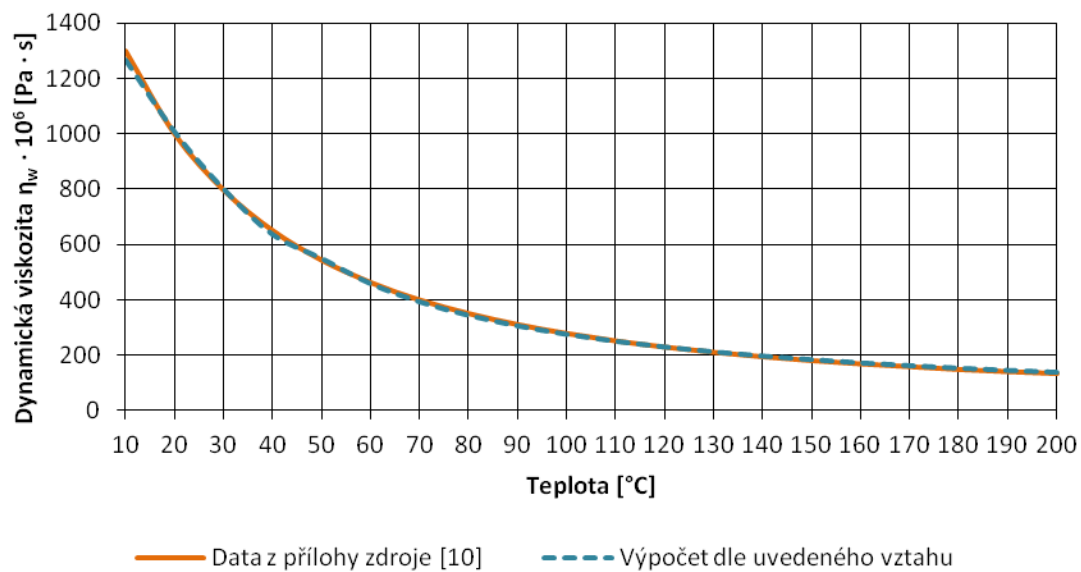
$$\eta_w = (9,81 \cdot 10^{-6} \cdot e^{5,09-0,023 \cdot t_w}) \quad [Pa \cdot s] \quad (1.4)$$

$t_w$  teplota vody [°C]

$$\eta_w = (0,027415 \cdot t_w^{-1}) \quad [Pa \cdot s] \quad (1.5)$$

$t_w$  teplota vody [°C]

Závislost dynamické viskozity vody na její teplotě při tlaku nasycení zobrazuje **Graf 5**. Také je v něm porovnání výsledků z přílohy zdroje [10] s výpočtem dle vztahu (1.4 a 1.5).



**Graf 5** - Závislost dynamické viskozity vody na její teplotě

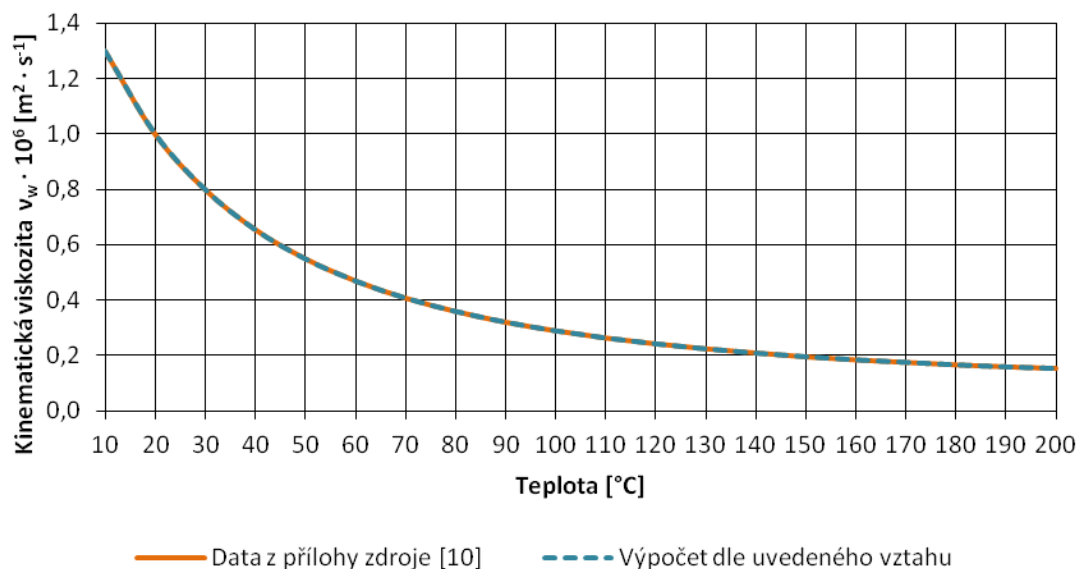
Kinematická viskozita vody je definována jako podíl dynamické viskozity vody a měrné hmotnosti vody **(1.6)**. [12]

$$\nu_w = \frac{\eta_w}{\rho_w} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (1.6)$$

$\eta_w$  dynamická viskozita vody [Pa · s]

$\rho_w$  měrná hmotnost vody [kg · m<sup>-3</sup>]

Závislost kinematické viskozity vody na její teplotě při tlaku nasycení zobrazuje **Graf 6**. Také je v něm porovnání výsledků z přílohy zdroje [10] s výpočtem dle vztahu **(1.6)**.



**Graf 6** - Závislost kinematické viskozity vody na její teplotě

#### A.4.2 Stanovení přípojného tepelného výkonu

Jednotlivé úseky potrubí se navrhují na jejich přípojný tepelný výkon. Tedy na tepelný výkon jednotlivých odběrných míst, která jsou napojena na právě řešený úsek.

$$Q_P = \text{Max} \left\{ 0,7 \cdot \frac{(\sum Q_{VYT} + \sum Q_{VZT}) + \sum Q_{TV} + \sum Q_{TECH}}{\sum Q_{VYT} + \sum Q_{VZT} + \sum Q_{TECH}} \right\} [W] \quad (1.7)$$

$Q_P$	přípojný tepelný výkon řešeného úseku [W]
$\sum Q_{VYT}$	suma všech tepelných výkonů pro vytápění v řešeném úseku [W]
$\sum Q_{VZT}$	suma všech tepelných výkonů pro vzduchotechniku v řešeném úseku [W]
$\sum Q_{TV}$	suma všech tepelných výkonů pro ohřev teplé vody v řešeném úseku [W]
$\sum Q_{TECH}$	suma všech tepelných výkonů pro technologii v řešeném úseku [W]

Při návrhu je potřeba uvažovat rezervu v tepelném výkonu - tepelné ztráty potrubí. Z toho důvodu je třeba ke stanovenému přípojnému tepelnému výkonu přičíst tepelnou ztrátu potrubních rozvodů (1.8).

$$Q_{P,celk} = Q_P + Q_z [W] \quad (1.8)$$

$Q_{P,celk}$	celkový přípojný tepelný výkon řešeného úseku [W]
$Q_P$	přípojný tepelný výkon řešeného úseku [W]
$Q_z$	tepelná ztráta potrubních rozvodů v řešeném úseku [W]

Tepelnou ztrátu potrubních rozvodů lze určit výpočtem, do kterého vstupuje mnoho činitelů. Je třeba znát teplotu teplotnosné látky, zda je potrubí vedeno v zemině či

kolektoru, geometrie potrubí, tloušťka tepelné izolace a především charakteristiky použitých materiálů (např. součinitel tepelné vodivosti). Tepelné ztráty potrubí jsou nejvíce ovlivněny právě použitým materiálem a tloušťkou tepelné izolace.

#### A.4.3 Stanovení hmotnostního průtoku v potrubí

„Hmotnostní průtok je definován jako hmotnost kapaliny, která proteče průtočným průřezem za jednotku času.” [12]

$$m_w = A_p \cdot w \cdot \rho_w \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (1.9)$$

$A_p$	plocha průřezu potrubí kolmá k proudu [ $m^2$ ]
$w$	rychlost proudění v daném průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$\rho_w$	měrná hmotnost teplotnosné látky - vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Při známém tepelném výkonu a rozdílu teplot mezi teplotou teplotnosné látky v přívodním a vratném potrubí lze také stanovit hmotnostní průtok dle kalorimetrické rovnice (1.10).

$$Q_{P,celk} = m_w \cdot c_w \cdot (t_{w1} - t_{w2}) \quad [W] \quad (1.10)$$

$Q_{P,celk}$	celkový přípojný tepelný výkon řešeného úseku [W]
$m_w$	hmotnostní průtok v řešeném úseku [ $kg \cdot s^{-1}$ ]
$c_w$	měrná tepelná kapacita teplotnosné látky - vody [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$t_{w1}$	teplota teplotnosné látky - vody v přívodním potrubí [ $^{\circ}C$ ]
$t_{w2}$	teplota teplotnosné látky - vody ve vratném potrubí [ $^{\circ}C$ ]

Jelikož je teplota teplotnosné látky (vody) v přívodním a vratném potrubí rozdílná, je dobré pro zpřesnění výpočtu přiřadit dané teplotě její hodnotu měrné tepelné kapacity. Lze tedy napsat upravenou rovnici (1.10) rovnicí (1.11).

$$Q_{P,celk} = m_w \cdot [(c_{w1} \cdot t_{w1}) - (c_{w2} \cdot t_{w2})] \quad [W] \quad (1.11)$$

$Q_{P,celk}$	celkový přípojný tepelný výkon řešeného úseku [W]
$m_w$	hmotnostní průtok v řešeném úseku [ $kg \cdot s^{-1}$ ]
$c_{w1}$	měrná tepelná kapacita teplotnosné látky - vody, pro teplotu $t_{w1}$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$c_{w2}$	měrná tepelná kapacita teplotnosné látky - vody, pro teplotu $t_{w2}$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$t_{w1}$	teplota teplotnosné látky - vody v přívodním potrubí [ $^{\circ}C$ ]
$t_{w2}$	teplota teplotnosné látky - vody ve vratném potrubí [ $^{\circ}C$ ]

Po úpravě rovnice (1.11) lze zapsat vyjádření hmotnostního průtoku dle rovnice (1.12).

$$m_w = \frac{Q_{P,celk}}{[(c_{w1} \cdot t_{w1}) - (c_{w2} \cdot t_{w2})]} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (1.12)$$

#### A.4.4 Stanovení objemového průtoku v potrubí

„Objemový průtok je definován jako objem kapaliny, který proteče průtočným průřezem za jednotku času.” [12]

$$M_w = A_p \cdot w \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1.13)$$

$A_p$	plocha průřezu potrubí kolmá k proudu [ $m^2$ ]
$w$	rychlost proudění v daném průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Pokud je známa hodnota hmotnostního průtoku kapaliny (např. z kalorimetrické rovnice) lze stanovit objemový průtok kapaliny dle vztahu (1.14).

$$M_w = \frac{m_w}{\rho_w} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1.14)$$

$m_w$	hmotnostní průtok v řešeném úseku [ $kg \cdot s^{-1}$ ]
$\rho_w$	měrná hmotnost teplotnosné látky - vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]



## A.4.5 Rovnice pohybu kapalin

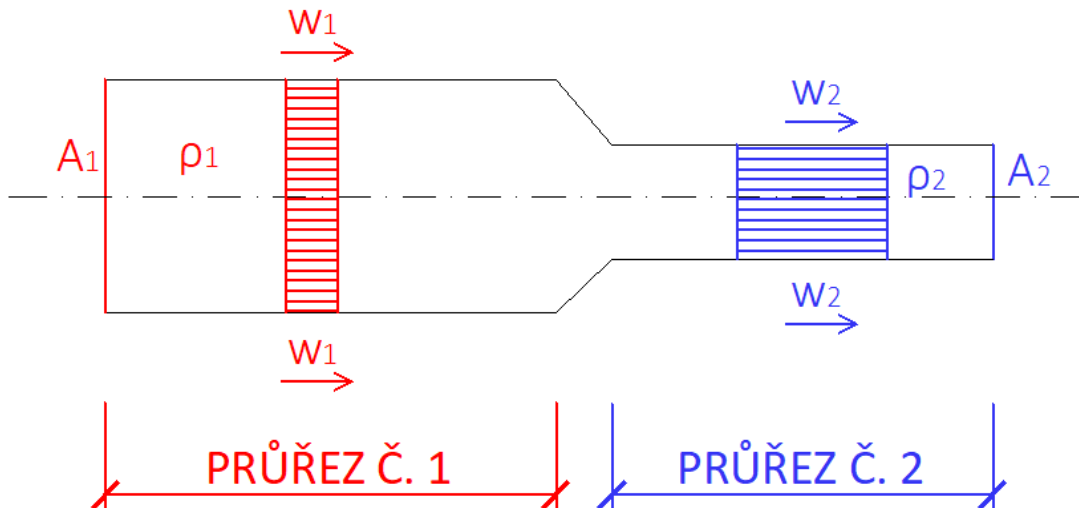
### Rovnice kontinuity

Při ustáleném proudění kapalin je součin průřezové plochy a rychlosti proudění v každé části průřezu shodný. Tuto závislost popisuje rovnice kontinuity, jejíž část již byla zmíněna u vztahů pro výpočet hmotnostního a objemového průtoku. Rovnice kontinuity pro reálnou kapalinu je popsána vztahem (1.15).

$$M_{w1} = M_{w2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.15)$$

$$A_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2$$

$M_{w1}$	objemový průtok v průřezu č. 1 [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$M_{w2}$	objemový průtok v průřezu č. 2 [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$A_1$	plocha průřezu v průřezu č. 1 [ $\text{m}^2$ ]
$A_2$	plocha průřezu v průřezu č. 2 [ $\text{m}^2$ ]
$w_1$	rychlost proudění v průřezu č. 1 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$w_2$	rychlost proudění v průřezu č. 2 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\rho_1$	měrná hmotnost teplotnosné látky v průřezu č. 1 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\rho_2$	měrná hmotnost teplotnosné látky v průřezu č. 2 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]



Obr. 19 - Grafické znázornění rovnice kontinuity

## Bernoulliho rovnice

Další důležitou rovnicí je Bernoulliho rovnice pro ustálené proudění ideální kapaliny. Její zápis je definován jako součet polohové (geodetické) výšky uvažovaného těžiště průtočného průřezu nad libovolnou srovnávací rovinou, tlakové výšky a rychlostní výšky. Zápis Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu, která je považována za nestlačitelnou, ale uvažuje se vnitřní tření je uveden ve vztahu (1.16). [12]

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot w_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot w_2^2}{2 \cdot g} + h_z \quad [m] \quad (1.16)$$

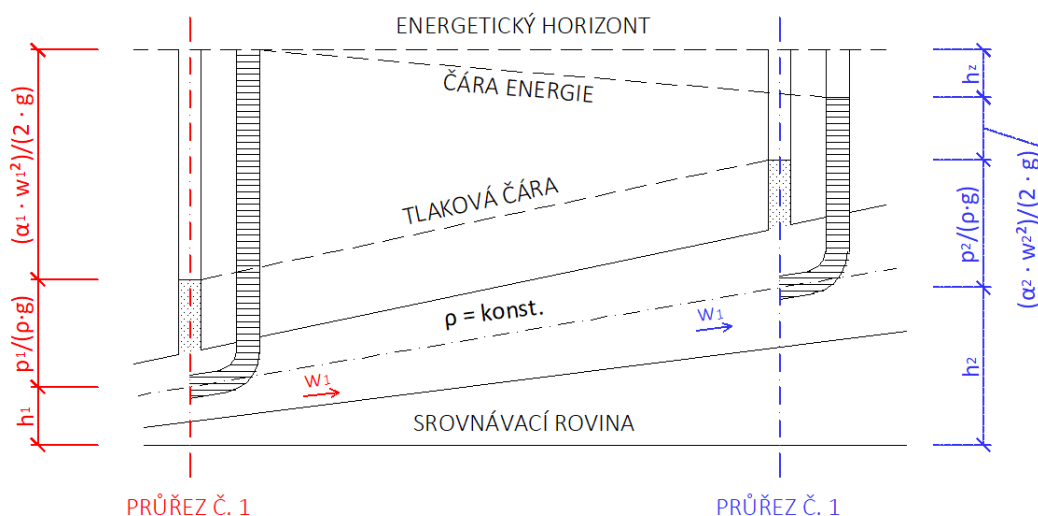
$h_i$  polohová (statická) výška v daném průřezu [m]

$\frac{p_i}{\rho \cdot g}$  tlaková výška v daném průřezu [m]

$\frac{\alpha_i \cdot w_i^2}{2 \cdot g}$  rychlostní výška v daném průřezu [m]

$h_z$  ztrátová výška mechanické energie [m]

Se ztrátovou výškou se vždy počítá v průřezu, který je vzdálenější po směru toku. Parametr  $\alpha_i$  označuje Coriolisovo číslo, které vyjadřuje podíl skutečné kinetické energie ke kinetické energii, určené za předpokladu, že rychlosti ve všech bodech průřezu jsou stejné. Tento parametr tedy vyjadřuje vliv nerovnoměrného rozdělení rychlostí v průřezu. Jeho hodnoty nabývají od 1,05 až 1,1. Při praktickém výpočtu se však jeho vliv zanedbává. [10]



**Obr. 20** - Grafické znázornění Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu [10]

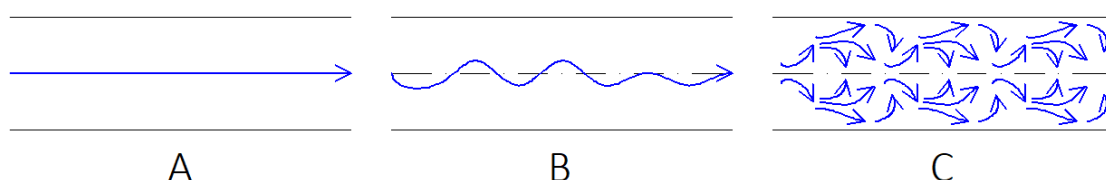
#### A.4.6 Proudění v potrubí

Při pohybu kapaliny v uzavřeném potrubí dochází ke ztrátám mechanické energie vlivem působení hydraulických odporů. Pro stanovení hydraulických ztrát je nutné v první řadě určit, jaké proudění kapaliny se v potrubí vyskytuje. [10]

Dle experimentu, který provedl Osborn Reynolds, rozlišujeme dva typy proudění - laminární a turbulentní.

Při laminárním proudění nedochází k mísení jednotlivých částic - pohybují se v souběžných drahách. Naopak při turbulentním proudění dochází k mísení částic vlivem nepravidelné pulzace složek rychlosti a tlaku kolem jejich střední hodnoty. [13]

Mezi laminární a turbulentní oblastí proudění se nachází přechodná oblast. V této oblasti může vznikat laminární i turbulentní proudění. Laminární proudění však může při jakémkoliv vnějším popudu okamžitě přejít do proudění turbulentního. [13]



**Obr. 21** - Znázornění proudění v potrubí [10]  
A - laminární, B - přechodný stav, C - turbulentní

O tom, zda se v potrubí vyskytuje laminární nebo turbulentní proudění rozhoduje Reynoldsovo číslo. Jedná se o bezrozměrnou veličinu. Rozdělení mezi laminárním a turbulentním prouděním vyjadřuje kritická hodnota Reynoldsova čísla ( $Re = 2320$ ). Pro stanovení Reynoldsova čísla u kruhového potrubí platí vztah (1.17). [10]

$$Re = \frac{w \cdot d_{pi}}{\nu} \quad [-] \quad (1.17)$$

$w$	rychlost proudění v potrubí [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$d_{pi}$	vnitřní průměr potrubí [m]
$\nu$	kinematická viskozita proudící kapaliny [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

### A.4.7 Tlakové ztráty v potrubí

Tlakové ztráty jsou způsobeny vlivem tření mezi pohybujícími se vrstvami viskózní kapaliny o různých rychlostech a vlivem tření o pevný povrch (tlakové ztráty třením). Další tlakové ztráty vznikají při změně proudění nebo při obtékání překážek (tlakové ztráty místními odpory). Stanovení tlakové ztráty v potrubí je důležité pro správné nadimenzování oběhových čerpadel. [10]

Po úpravě Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu, která je považována za nestlačitelnou (1.16) je možno vyjádřit ztrátovou výšku mechanické energie dle rovnice (1.18).

$$h_z = \left( h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot w_1^2}{2 \cdot g} \right) - \left( h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot w_2^2}{2 \cdot g} \right) [m] \quad (1.18)$$

$h_i$  polohová (statická) výška v daném průřezu [m]

$\frac{p_i}{\rho \cdot g}$  tlaková výška v daném průřezu [m]

$\frac{\alpha_i \cdot w_i^2}{2 \cdot g}$  rychlostní výška v daném průřezu [m]

$h_z$  ztrátová výška mechanické energie [m]

Tato ztrátová výška je rovna tlakovým ztrátám v řešené části potrubí.

$$h_z = Z [m] \quad (1.19)$$

$h_z$  ztrátová výška mechanické energie [m]

$Z$  celková tlaková ztráta v řešené části potrubí [m]

Celková tlaková ztráta se skládá ze dvou částí a to z tlakové ztráty třením a tlakové ztráty místními odpory.

$$Z = Z_T + Z_{MO} [m] \quad (1.20)$$

$Z_T$  tlaková ztráta třením [m]

$Z_{MO}$  tlaková ztráta místními odpory [m]

#### A.4.7.1 Tlakové ztráty třením

Pro výpočet tlakové ztráty třením je možné použít Darcyho - Weisbachovu rovnici (1.21), do které vstupuje délka a vnitřní průměr potrubí, rychlost proudění v potrubí a součinitel tření.

$$Z_T = \lambda_T \cdot \frac{l_p}{d_{pi}} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (1.21)$$

$\lambda_T$	součinitel tření [-]
$l_p$	délka potrubí [m]
$d_{pi}$	vnitřní průměr potrubí [m]
$w$	rychlost proudění v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$g$	gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

Aby bylo vyjádření v pascálech, musí být vztah pro výpočet tlakové ztráty třením upraven (1.22).

$$\Delta p_T = \lambda_T \cdot \frac{l_p}{d_{pi}} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_w \quad [Pa] \quad (1.22)$$

$\lambda_T$	součinitel tření [-]
$l_p$	délka potrubí [m]
$d_{pi}$	vnitřní průměr potrubí [m]
$w$	rychlost proudění v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$\rho_w$	měrná hmotnost proudící kapaliny - vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Součinitel tření je ovlivněn rychlostí proudící kapaliny, její viskozitou, průměrem a drsností potrubí. Rychlost a viskozitu proudící kapaliny zohledňuje Reynoldsovo číslo. Drsnost potrubí je ovlivněna materiálem potrubí, ale také korozí povrchu stěn či usazeninami na povrchu stěn potrubí. [10] Při stanovení součinitele tření lze rozdělit proudění na pět oblastí:

### **Oblast laminárního proudění** ( $R_e < 2320$ )

Do výpočtu součinitele tření vstupuje pouze Reynoldsovo číslo. Výpočetní vztah určuje Hagen - Poiseuillův zákon (**1.23**). [15]

$$\lambda_T = \frac{64}{R_e} \quad [-] \quad (1.23)$$

$R_e$  Reynoldsovo číslo [-]

### **Oblast přechodu** ( $2320 < R_e < 4000$ )

Součinitel tření je třeba určit jak pro laminární tak i pro turbulentní oblast proudění. Na stranu bezpečnou je rozhodující ta větší z vypočtených hodnot. [14]

### **Hydraulicky hladké potrubí**

V turbulentní oblasti proudění je součinitel tření ještě stále závislí pouze na Reynoldsově čísle. Vztahy pro stanovení součinitele tření hydraulicky hladkých potrubí jsou uvedeny spolu s autory i oblastí použití v **Tab.2**. [12]

Autor vztahu	Vztah	Oblast použití
Prandtl - Kármán	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = 2 \cdot \log R_e \cdot \sqrt{\lambda_T} - 0,8$	$4 \cdot 10^3 < R_e < 10^8$
Altšul	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = 1,82 \cdot \log \frac{R_e}{100} + 2$	$2,5 \cdot 10^3 < R_e < 10^{12}$
Blasius	$\lambda_T = \frac{0,3164}{R_e^{0,25}}$	$4 \cdot 10^3 < R_e < 10^5$
Konakov	$\lambda_T = (1,8 \cdot \log R_e - 1,5)^{-2}$	$4 \cdot 10^3 < R_e < 10^5$

**Tab. 2** - Vztahy pro stanovení součinitele tření hydraulicky hladkých potrubí [15]

### Kvadratická oblast ztrát třením

Do výpočtu součinitele tření vstupuje poměrná drsnost stěny potrubí, která je definována jako poměr mezi ekvivalentní drsností stěny potrubí a vnitřním průměrem potrubí (1.24). [14]

$$r_p = \frac{k_p}{d_{pi}} \quad [-] \quad (1.24)$$

$k_p$  ekvivalentní drsnost stěny potrubí [mm]

$d_{pi}$  vnitřní průměr potrubí [mm]

Typ potrubí a jeho povrch	Drsnost stěny potrubí $k_p$ [mm]
Nové ocelové trubky tažené	0,01 - 0,05
Nové ocelové trubky válcované	0,04 - 0,10
Nové ocelové trubky svařované	0,05 - 0,10
Ocelové trubky s mírně orezavělým povrchem	0,15 - 0,20
Ocelové trubky mírně orezavělé se slabím nánosem	0,15 - 0,50
Ocelové trubky se silnějšími inkrustacemi	až 1,50 (i více)

**Tab. 3** - Ekvivalentní drsnost stěny potrubí v závislosti na jeho povrchu [4]

Vztah pro stanovení součinitele tření v kvadratické oblasti ztrát třením je uveden v **Tab.4**.

Autor vztahu	Vztah	Oblast použití
Šifrinson	$\lambda_T = 0,11 \cdot r_p^{0,25}$	$Re \cdot r_p > 500$

**Tab. 4** - Vztah pro stanovení součinitele tření v kvadratické oblasti ztrát třením [15]

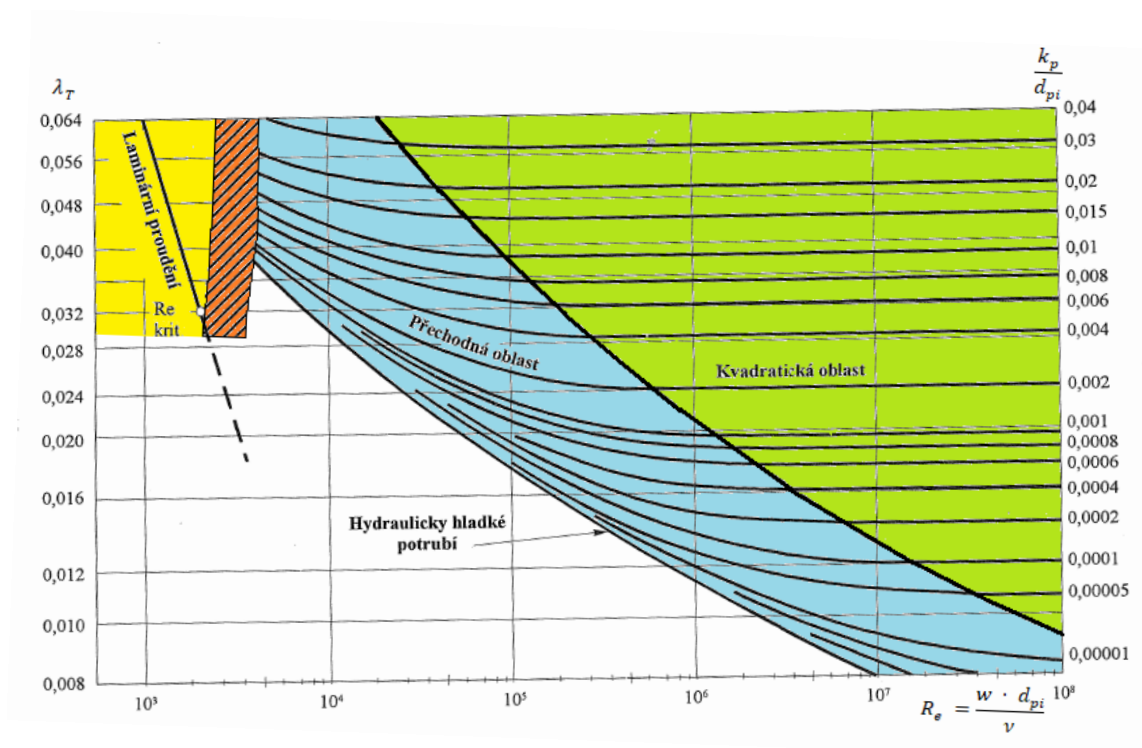
### Přechodná oblast ztrát třením

Do výpočtu součinitele tření vstupuje poměrná drsnost stěny potrubí i Reynoldsovo číslo. Vztahy pro stanovení součinitele tření v přechodné oblasti ztrát třením jsou uvedeny spolu s autory i oblastí použití v **Tab.5**. [15]

Autor vztahu	Vztah	Oblast použití
Colebrook - White	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2,51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda_T}} + \frac{k_p}{3,71 \cdot d_{pi}} \right)$	$R_e > 4 \cdot 10^3$
Moody	$\lambda_T = 0,0053 \cdot \left[ 1 + \left( 20000 \cdot r_p + \frac{10^6}{R_e} \right)^{1/3} \right]$	$4 \cdot 10^3 < R_e < 10^7$ $r_p < 10^{-1}$
Altšul	$\lambda_T = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{R_e} + r_p \right)^{0,25}$	$R_e > 4 \cdot 10^3$
El - Abdala	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \cdot \log \left( \frac{6,524}{R_e^{0,908}} + \frac{k_p}{3,71 \cdot d_{pi}} \right)$	$10^4 < R_e < 10^8$ $10^{-5} < r_p < 10^{-1}$
Haaland	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -1,8 \cdot \log \left[ \frac{6,9}{R_e} + \left( \frac{k_p}{3,71 \cdot d_{pi}} \right)^{1,11} \right]$	$4 \cdot 10^3 < R_e < 10^8$ $0 < r_p < 10^{-2}$

**Tab. 5** - Vztahy pro stanovení součinitele tření v přechodné oblasti ztrát třením [15]

Colebrook - Whiteova rovnice je graficky znázorněna pomocí Moodyho diagramu. Díky tomuto diagramu je možné při známém Reynoldsově čísle a poměrné drsnosti stěny potrubí určit součinitele tření. [12]



**Obr. 22**- Moodyho diagram [15]



#### A.4.7.2 Tlakové ztráty místními odpory

Do výpočtu tlakové ztráty místními odpory vstupuje rychlost proudění v potrubí a součinitel místních ztrát.

$$Z_{MO} = \xi_{MO} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (1.25)$$

$\xi_{MO}$	součinitel místních ztrát [-]
$w$	rychlost proudění v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$g$	gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

Aby bylo vyjádření v pascalech, musí být vztah pro výpočet tlakové ztráty místními odpory upraven (1.26).

$$\Delta p_{MO} = \xi_{MO} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_w \quad [Pa] \quad (1.26)$$

$\xi_{MO}$	součinitel místních ztrát [-]
$w$	rychlost proudění v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$\rho_w$	měrná hmotnost proudící kapaliny - vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Tlaková ztráta místními odpory je např. způsobena změnou dimenze potrubí (redukce), dělením a spojováním proudů, použitím kolen a odboček, použitými armaturami (např. zpětná klapka, uzavírací ventil, aj.) a použitým zařízením (kotel, otopné těleso, výměník tepla, aj.). Příklady hodnot součinitele místního odporu pro hydraulicky krátká potrubí jsou uvedeny v příloze **P1**.

Součinitele místních ztrát lze stanovit v některých případech početně, ale ve většině případů je stanovován na základě experimentálního měření.

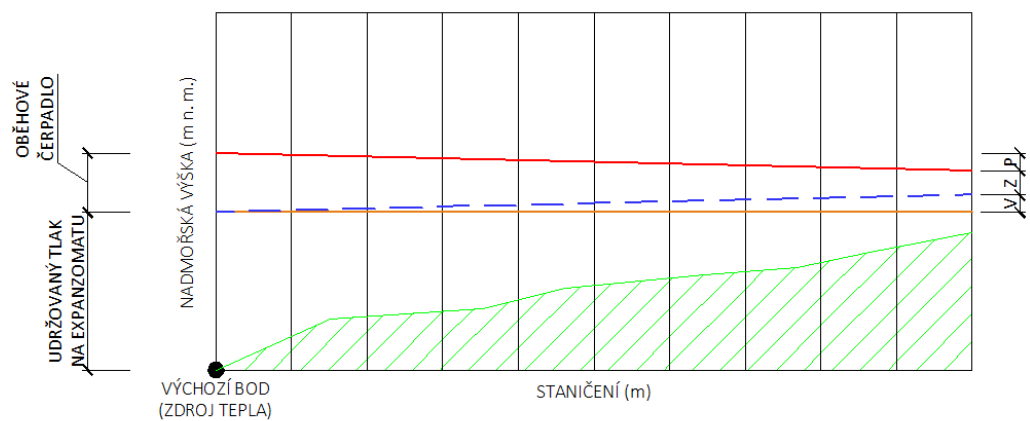
Při výpočtu hydraulicky krátkých potrubí je nutné s tlakovou ztrátou místními odpory uvažovat. U výpočtu hydraulicky dlouhých potrubí (např. tepelné sítě) rozhodují tlakové ztráty třením a tlakové ztráty místními odpory se zanedbávají nebo se uvažují náhradní délkou potrubí. Pokud se však ve výpočtovém modelu vyskytuje armatura, která způsobuje tlakovou ztrátu v závislosti na svém pootevření a je větší než tlaková ztráta třením, je nutné s touto tlakovou ztrátou uvažovat. [15]

#### A.4.8 Tlakový diagram teplovodní tepelné sítě

Tlakový diagram vyjadřuje průběh tlaků po délce hydraulicky hlavní větve. Za hydraulicky hlavní větev je při správném návrhu tepelné sítě považována ta, která propojuje zdroj tepla s hydraulicky nejvzdálenějším spotřebičem (odběrným místem). Do tohoto místa musí být zajištěna správná doprava teplotonosné látky od zdroje tepla. Aby tak bylo učiněno, musí být překonán největší rozdíl tlaků mezi přívodním a vratným potrubím v místě umístění zdroje tepla. Z rozdílu těchto tlaků se poté dimenzují oběhová čerpadla. [4]

Postup pro sestavení tlakového diagramu teplovodní tepelné sítě s tlakově nezávislými předávacími stanicemi je následující: [4]

- vykreslení výškového profilu u hydraulicky hlavní větve (od zdroje tepla po nejvzdálenější odběrné místo)
- pro jednotlivé úseky se stanoví tlakové ztráty v přívodním a vratném potrubí
- v hydraulicky nejvzdálenějším spotřebiči se určí tlaková ztráta zařízení v něm umístěném (např. deskový výměník)
- poté se provede součet veškerých spočtených tlakových ztrát v přívodním potrubí, vratném potrubí a zařízení v hydraulicky nejvzdálenějším spotřebiči, díky kterému se stanoví minimální dopravní výška oběhového čerpadla
- pokud by byla známá hodnota tlaku v sání nebo výtlaku čerpadla (hodnota nastavená na expanzním automatu - expanzomatu) bylo by možné vykreslit průběh tlaku do výškového profilu hydraulicky hlavní větve (tuto hodnotu však stanovuje projektant)
- poloha celého diagramu nad zdrojem tepla musí být taková, aby při žádném z provozních stavů (např. při vypnutí oběhových čerpadel) nedošlo v žádném místě k poklesu tlaku teplotonosné látky (vody) pod tlak na mezi sytosti teplotonosné látky
- pokud by bylo připojení tlakově závislé, nesměl by žádný z objektů protnout čáru přetlaku ve vratném potrubí - došlo by k přetržení sloupce kapaliny, oběh teplotonosné látky v daném objektu by byl přerušen a nastalo by její odpařování, jelikož by ve výše umístěném potrubí vznikl podtlak



### LEGENDA:

—	HKST (HLADINA KONSTANTNÍHO STATICKÉHO TLAKU)	P	TLAKOVÁ ZTRÁTA V PŘÍVODNÍM POTRUBÍ
—	TERÉN	Z	TLAKOVÁ ZTRÁTA ZAŘÍZENÍ - VÝMĚNÍK TEPLA
—	PŘÍVOD - ČÁRA PŘETLAKU	V	TLAKOVÁ ZTRÁTA VE VRATNÉM POTRUBÍ
- - -	VRAT - ČÁRA PŘETLAKU		

**Obr. 23** - Tlakový diagram



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV  
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

## B. APLIKACE TÉMATU

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Tomáš Malach

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HIRŠ, CSc.

BRNO 2018

## B.1 Popis řešené lokality

Řešené sídliště, které je zásobováno formou SCZT se nachází v Brně v městské části Nový Lískovec. Jedná se o větrnou oblast s otevřenou krajinou a výpočtová venkovní teplota vzduchu pro určení tepelné ztráty je dle české technické normy ČSN EN 12831 Tepelné soustavy v budovách - Výpočet tepelného výkonu -12 °C.

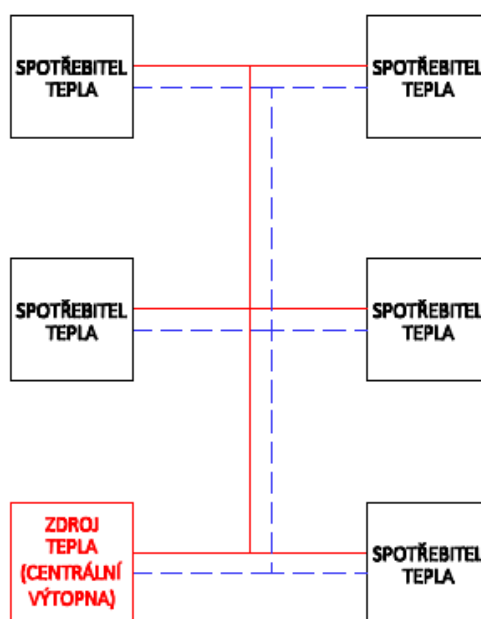
Mezi nejvíce se vyskytujícími objekty v této lokalitě patří především panelové domy, jejichž výstavba probíhala přibližně v 60. až 80. letech 20. století. Většina panelových domů prošla v posledních letech rekonstrukcí za účelem snížení nákladů za vytápění (kompletní zateplení obálky budovy a výměna výplní otvorů). V lokalitě se nenachází pouze panelové domy, ale také mateřská a základní škola, administrativní a komerční budovy, obchodní dům a domov pro seniory. Celou tepelnou síť provozují a řídí Teplárny Brno.



Obr. 24 - Mapa řešené lokality

## B.2 Charakteristika principu dodávky tepla v řešené lokalitě

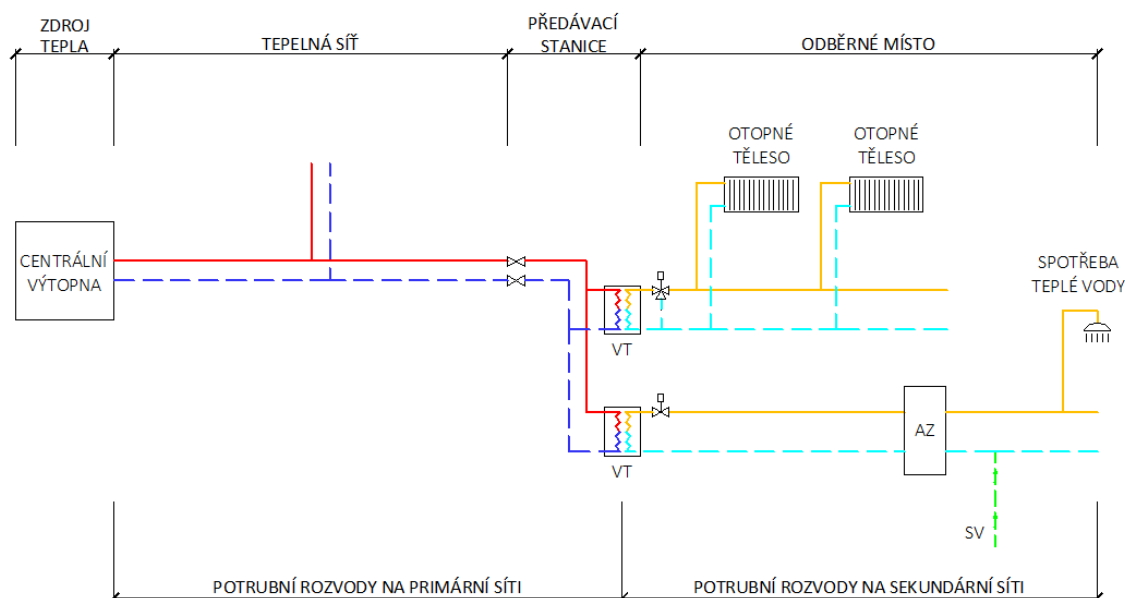
Jako zdroj tepla pro jednotlivá odběrná místa je v řešené lokalitě centrální výtopna Kamenný vrch (CVKV). Odtud je teplo dodáváno pomocí teponosné látky proudící v potrubních rozvodech k jednotlivým spotřebitelům. Jako teponosná látka je v tomto případě voda o maximální teplotě 110 °C. Jedná se tedy o teplovodní síť. Obecný princip dodávky tepla formou SCZT v řešené lokalitě je zobrazen na **Obr. 25**.



**Obr. 25** - Obecné schéma SCZT v řešené lokalitě

Detailnější princip SCZT v řešené lokalitě je ilustrován na **Obr. 26**, kde je patrné, že výchozím bodem je centrální výtopna. Odtud je distribuováno teplo přes tepelnou síť ke spotřebiteli tepla. Každý spotřebitel tepla (např. bytový dům) je vybaven tlakově nezávislou předávací stanicí (primární strana je od strany sekundární hydraulicky oddělena přes deskový výměník, na každé straně tedy proudí teponosná látka s jinými technickými parametry). Druh teponosné látky na vstupu a výstupu je voda - voda. V předávací stanici tedy dochází k úpravě technických parametrů teponosné látky z primární strany (potrubní rozvody mezi centrální výtopnou a výměníkem tepla umístěným v předávací stanici) přes výměník tepla (u teponosné látky voda - voda je používán deskový výměník) na stranu sekundární (potrubní rozvody mezi výměníkem tepla a odběrným místem). Za odběrné místo lze považovat objekt, který je potřeba vytápat nebo spotřebovává teplou vodu (mytí nádobí, denní

hygiena, ...). Do odběrného místa je tedy potřeba buď dodávat teplo na vytápění nebo na přípravu teplé vody, případně je potřeba kombinace obou možností, což je v řešené lokalitě nejběžnější situace. Teplota vody pro vytápění a pro přípravu teplé vody je rozdílná. Z toho důvodu je předávací stanice vybavena dvěma deskovými výměníky pro každou variantu.



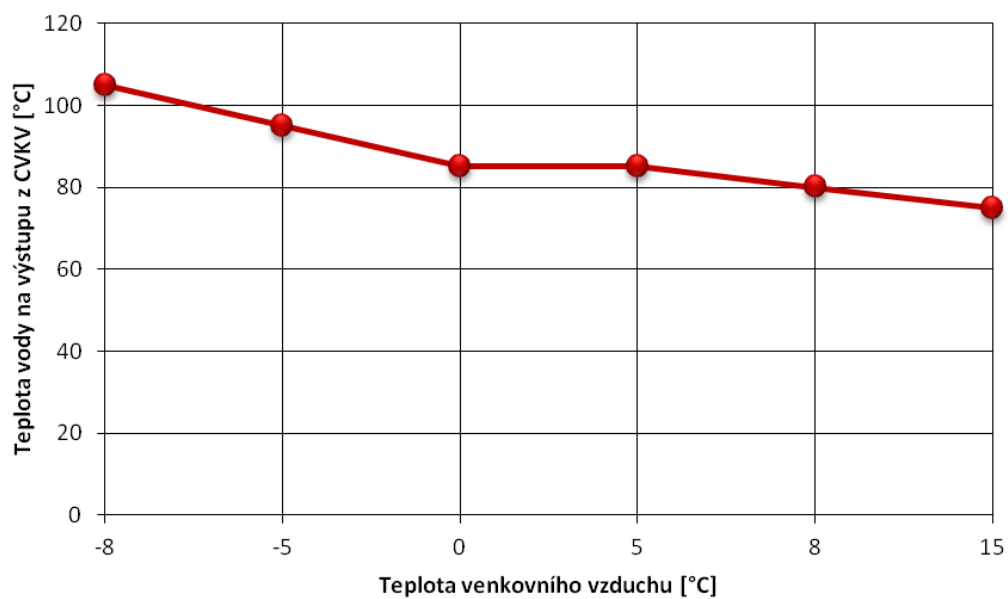
**Obr. 26** - Detailnější schéma SCZT v řešené lokalitě

VT - výměník tepla, AZ - akumulační zásobník, **přívodní potrubí - primární síť**, **vratné potrubí - primární síť**, **přívodní potrubí - sekundární síť**, **vratné potrubí - sekundární síť**, **přívod studené vody**

## B.3 Charakteristika zdroje tepla, potrubních rozvodů a odběrných míst v řešené lokalitě

### B.3.1 Zdroj tepla - centrální výtopna Kamenný vrch (CVKV)

Výrobu tepla zajišťují čtyři stacionární kotle a jedna kogenerační jednotka. Jako palivo je využíván zemní plyn. CVKV je vybavena řídicím systémem Johnson Control. Je autonomně řízena a lze ji dálkově řídit z centrály Špitálka. Data určující množství spotřebovaného tepla jsou monitorovány online, stejně tak jako dálkové řízení. Požadovaný výkon zdroje tepla je řízen ekvitermě. Ekvitermní křivka pro CVKV je zobrazena v **Grafu 7**.



**Graf 7** - Ekvitermní křivka CVKV

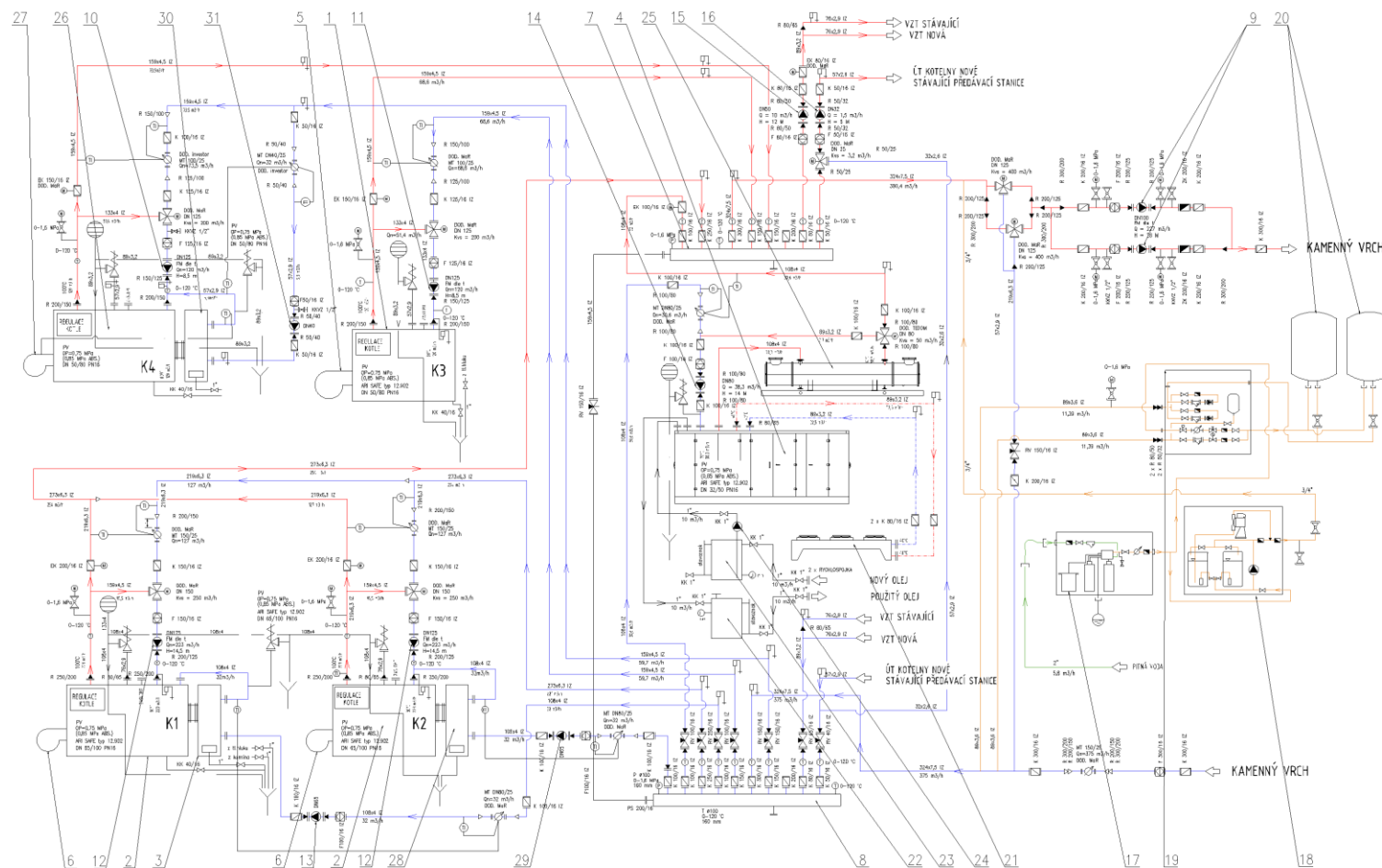
Zdroj tepla CVKV je zobrazen na **Obr. 27**.



**Obr. 27** - CVKV (zdroj tepla)

Schéma zapojení CVKV a tedy také celý proces výroby tepla je zobrazen na **Obr. 28**. Popis technologického schématu CVKV je uveden v následujícím textu za **Obr. 28**.





Obr. 28 - Technologické schéma CVKV [21]

Potrubí s topnou vodou je v technologickém schématu označeno červeně, s vratnou vodou modře, expanzní potrubí oranžově a přívod studené vody zeleně. Přívodní potrubí do vzduchového chladiče je označeno červenou čerchovanou čarou s dvěma tečkami a vratné potrubí ze vzduchového chladiče má označení modrou čerchovanou čarou s jednou tečkou.

Tři kotlové soustavy jsou stávající (jedná se o soustavy K1, K2 a K3). Soustava K4 je nově zrealizovaná.

Kotle ve všech čtyřech soustavách jsou stacionární, ocelové a teplovodní pro spolupráci s tlakovým hořákem.

Všechny kotle využívají automatické plynové hořáky, které jsou určené ke spalování plyných paliv (PZ - zemní plyn, středotlaký). Použité typy jsou následující APH - M (mechanická vazba palivo - vzduch) a APH - ME (elektronická vazba palivo - vzduch). Provedení je nízkoemisní (LOW NOx). Průměrně dosahované hodnoty NOx se pohybují v rozmezí 50 až 90 mg/m<sup>3</sup> a CO < 50 mg/m<sup>3</sup>.

Soustavy K1, K2 a K4 obsahují spalínový výměník, který slouží k předeřtí vratné vody pomocí vysoké teploty spalin před vstupem do kotle (teplo ze spalin je předáno vratné vodě). Dochází tak ke zvýšení účinnosti kotlové soustavy a snížení spotřeby paliva.

Pojistným ventilem jsou vybaveny všechny čtyři kotle. Jeho úkolem je ochránit kotel před překročením maximálního provozního tlaku.

Oběhová čerpadla jsou u všech kotlových soustav umístěna na vratném potrubí. Soustavy obsahující spalínový výměník (jedná se o soustavy K1, K2 a K4) mají navíc umístěné oběhové čerpadlo na potrubí vratné vody před vstupem do spalínového výměníku.

### **Specifikace kotlových soustav:**

#### **Soustava K1:**

Nízkoteplotní kotel: FERROLI PREXTHERM T3G (jmenovitý výkon 5 200 kW)

- **označení č. 2**

Hořák: APH 90 - ME - PZ - LOW NO<sub>x</sub> - **označení č. 6**

Spalinový výměník: FERROLI ECOPREX 520 (jmenovitý výkon cca. 220 kW)

- **označení č. 3**

Kotlové oběhové čerpadlo: GRUNDFOS NBE 125 - 250 / 243;  $M_{\dot{e}} = 223 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

$H_{\dot{e}} = 14,5 \text{ m}$  - **označení č. 12**

Kotlové oběhové čerpadlo spalinového výměníku: GRUNDFOS TP 65 - 120 / 2;

$M_{\dot{e}} = 32 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $H_{\dot{e}} = 10 \text{ m}$  - **označení č. 13**

#### **Soustava K2:**

Nízkoteplotní kotel: FERROLI PREXTHERM T3G (jmenovitý výkon 5 200 kW)

- **označení č. 2**

Hořák: APH 90 - ME - PZ - LOW NO<sub>x</sub> - **označení č. 6**

Spalinový výměník: FERROLI ECOPREX 520 (jmenovitý výkon cca. 220 kW)

- **označení č. 28**

Kotlové oběhové čerpadlo: GRUNDFOS NBE 125 - 250 / 243;  $M_{\dot{e}} = 223 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

$H_{\dot{e}} = 14,5 \text{ m}$  - **označení č. 12**

Kotlové oběhové čerpadlo spalinového výměníku: GRUNDFOS TP 65 - 120 / 2;

$M_{\dot{e}} = 32 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $H_{\dot{e}} = 10 \text{ m}$  - **označení č. 29**

#### **Soustava K3:**

Nízkoteplotní kotel: FERROLI PREXTHERM T3G (jmenovitý výkon 2 800 kW)

- **označení č. 1**

Hořák: APH 45 - ME - PZ - LOW NO<sub>x</sub> - **označení č. 5**

Kotlové oběhové čerpadlo: GRUNDFOS TPE 125 - 110 / 4 - S;  $M_{\dot{e}} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

$H_{\dot{e}} = 8,5 \text{ m}$  - **označení č. 11**

#### Soustava K4:

Nízkoteplotní kotel: FERROLI PREXTHERM T3G (jmenovitý výkon 2 800 kW)  
- **označení č. 26**

Hořák: APH 45 - M - PZ - LOW NO<sub>x</sub> - **označení č. 27**

Spalinový výměník: jmenovitý výkon cca. 112 kW - **označení č. 30**

Kotlové oběhové čerpadlo: GRUNDFOS TPE 125 - 110 / 4 - S;  $M_{\dot{e}} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
 $H_{\dot{e}} = 8,5 \text{ m}$  - **označení č. 10**

Kotlové oběhové čerpadlo spalinového výměníku: GRUNDFOS TP 40 - 60 / 2;  
 $M_{\dot{e}} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $H_{\dot{e}} = 2 \text{ m}$  - **označení č. 31**

Kogenerační jednotka (KGJ) je zařízení pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Limit její provozní doby činí 4 400 hodin za rok. Po překročení této provozní doby během roku zůstává odstavena. Její využití nastává především v zimním období. KGJ je řízena na její plný nebo poloviční výkon.

#### Specifikace soustavy kogenerační jednotky:

Kogenerační jednotka: TEDOM QUANTO D770 SP (elektrický výkon: 774 kW a tepelný výkon: 893 kW) - **označení č. 4**

Technologický modul kogenerační jednotky - **označení č. 25**

Vzduchový chladič: ALFA LAVAL PALLADIO 4.0; typ: ALFBLUE DC; model: 1xBDMS903B - 6P (umístěný na venkovní fasádě) - **označení č. 21**

Kotlové oběhové čerpadlo kogenerační jednotky: GRUNDFOS TP 80 - 150 / 4;  
 $M_{\dot{e}} = 38,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $H_{\dot{e}} = 14 \text{ m}$  - **označení č. 14**

Nádrž na nový olej o objemu 150 l - **označení č. 23**

Nádrž na použitý olej o objemu 150 l - **označení č. 22**

Olejové čerpadlo - ISH GEARBLOC BMF 10M - **označení č. 24**

Rozdělovač (**označení č. 7**) a sběrač (**označení č. 8**) je propojen pomocí regulačního ventilu. Do rozdělovače jsou napojeny jednotlivé větve od kotlových soustav K1 až K4 (od kotlových soustav K1 a K2 vede do rozdělovače jedna společná větev Tichelmannovo zapojení). Dále je do rozdělovače napojena větev od kogenerační jednotky. Z rozdělovače vedou tři větve (větev pro vzduchotechniku vytopny, větev pro vytápění vytopny a větev pro rozvody tepla k jednotlivým odběrným místům napojeným na tepelnou síť v Novém Lískovci). Tyto tři větve mají na výstupu z rozdělovače osazena oběhová čerpadla.

### **Specifikace oběhových čerpadel na větvích z výstupu z rozdělovače:**

#### **Větev pro vzduchotechniku výtopny:**

Oběhové čerpadlo VZT výtopny: GRUNDFOS UPS 50 - 180F;  $M_{\xi} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
 $H_{\xi} = 12 \text{ m}$  - **označení č. 15**

#### **Větev pro vytápění výtopny:**

Oběhové čerpadlo ÚT výtopny: GRUNDFOS UPS 32 - 80 180;  $M_{\xi} = 115 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
 $H_{\xi} = 5 \text{ m}$  - **označení č. 16**

#### **Větev pro rozvody tepla k jednotlivým odběrným místům:**

Oběhové čerpadlo: GRUNDFOS TP 100 - 390 / 2;  $M_{\xi} = 195 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
 $H_{\xi} = 24 \text{ m}$  - **označení č. 9** (tyto oběhová čerpadla jsou dvě zapojená vedle sebe - paralelně, za účelem zvýšení objemového průtoku)

Do sběrače vstupuje stejný počet větví jako na výstupu z rozdělovače - tedy tři. Jedná se o vratná potrubí od VZT výtopny, vytápění výtopny a od rozvodů tepla zásobující teplem sídliště v Novém Lískovci. Před napojením vratného potrubí od vytápění výtopny a vratného potrubí tepelné sítě na sběrač dochází k rozbočení potrubí ke sběrači a k přívodnímu potrubí vytápění výtopny a k přívodnímu potrubí tepelné sítě, kde dle potřeby dochází k mísení vratné a přívodní vody pomocí trojcestného směšovacího ventilu. Ze sběrače vystupují jednotlivé větve opět ke kotlovým soustavám K1 až K4 a ke kogenerační jednotce.

Do úpravny vody AF 400 (**označení č. 17**), která slouží ke změkčování vody je napojeno potrubí pro doplňování vody do okruhu. Odtud je teplonosná látka vedena do doplňovacího a expanzního zařízení (**označení č. 19**) nebo do dávkovacího zařízení DC2 (**označení č. 18**), kde dojde k další úpravě teplonosné látky. Z dávkovacího zařízení je provedeno napojení na přívodní potrubí, které dodává teplo sídlišti v Novém Lískovci.

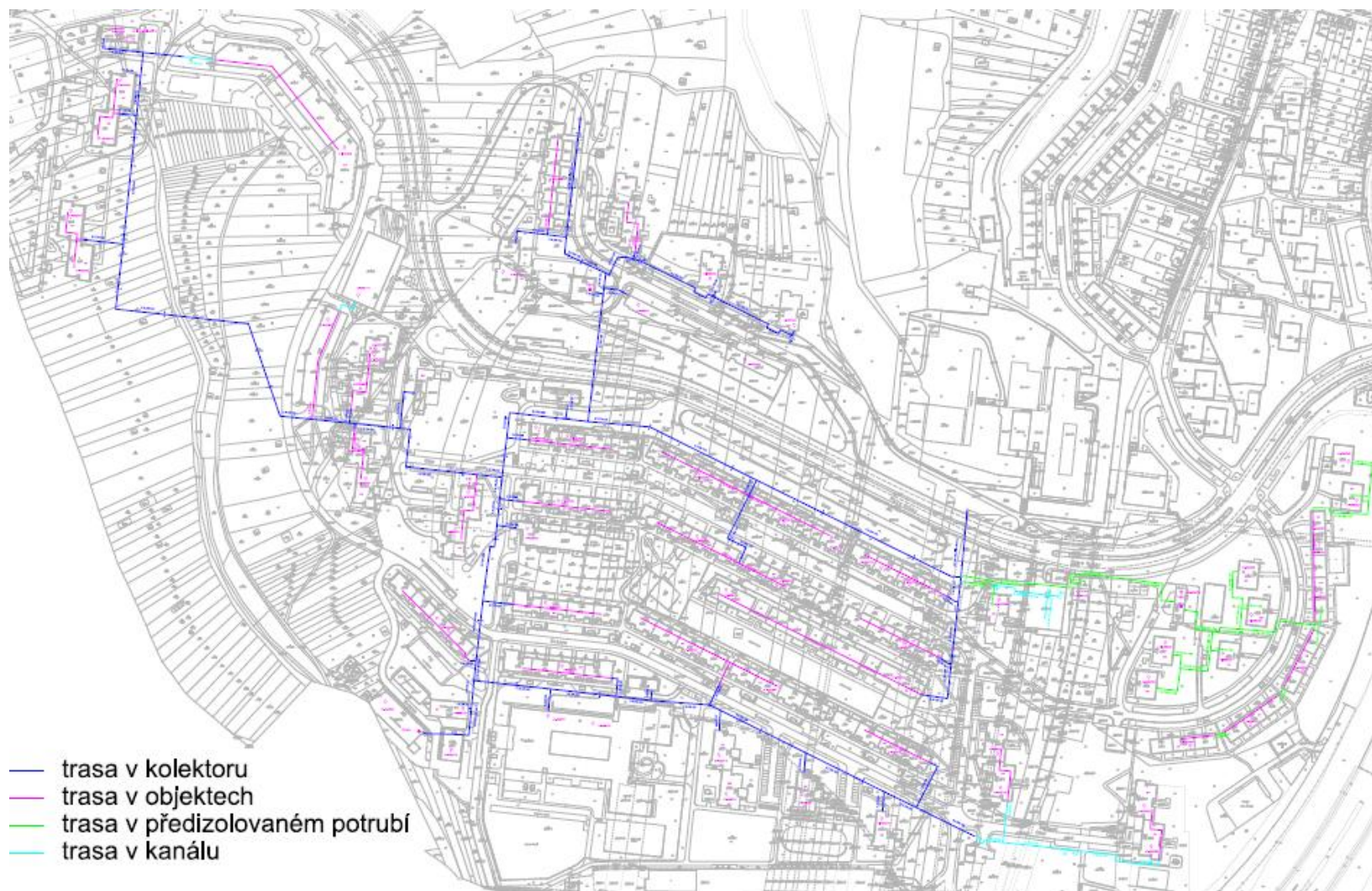
Expanzní zařízení je napojeno na vratné potrubí ze sídliště v Novém Lískovci ještě před napojením na sběrač. Součástí je expanzní beztlaká nádrž (**označení č. 20**), která slouží jako zásoba vody pro primární okruh.

Úpravna vody, dávkovací zařízení, expanzní zařízení a expanzní beztlaká nádrž tvoří jeden celek - expanzní automat (expanzomat). Jeho funkcí je odvzdušňování

soustavy, změkčování doplňované vody, automatické doplňování vody a udržování konstantní hladiny tlaku v soustavě.

### **B.3.2 Potrubní rozvody**

Výchozím bodem tepelné sítě je zdroj tepla (CVKV). Odtud je teplo dodáváno pomocí potrubí ke spotřebiteli tepla. V lokalitě jsou využity čtyři možnosti vedení potrubí (v kolektoru, v kanálu, v předizolovaném potrubí a v objektu). Předizolované potrubí je vedeno v zemině. V ostatních případech vedení je použito ocelové potrubí s tepelnou izolací opatřené plechovým opláštěním. Sít' lze považovat za paprskovitou. Způsoby vedení potrubí jsou zobrazeny na **Obr. 29**.



**Obr. 29** - Trasy potrubí (paprskovitá síť) [21]



### B.3.3 Výměníkové stanice

Součástí tepelné sítě jsou tři výměňkové stanice. Nyní jsou využívány pouze dvě výměňkové stanice (VS4 a VS6). Tyto výměňkové stanice slouží k vyrovnání tlakových diferencí a upravují parametry teplotnosné látky (vody) tak, aby mohla být další odběrná místa napojena přes výměňkovou stanici jako tlakově závislá. Spotřebiče tepla, které jsou umístěny za těmito výměňkovými stanicemi, nejsou modelovány. Model rovněž neobsahuje spotřebiče tepla na ulicích Kamínky a Úpatní (nejsou napojeny na CVKV).



Obr. 30 Řešená tepelná síť a její části [18]



### **B.3.4 Domovní předávací stanice (DPS) - tlakově nezávislá**

Jednotlivé spotřebiče tepla obsahují DPS. Umístění je v prostoru určeném a připraveném pro provoz tohoto zařízení - technická místnost. Ve většině případů slouží DPS k přípravě teplé vody a k vytápění. DPS tedy obsahuje dva deskové výměníky.

Za primární stranu se považuje okruh mezi CVKV a deskovým výměníkem a za sekundární stranu se považuje okruh mezi deskovým výměníkem a odběrným místem. Sekundární strana se dělí na dva okruhy (pro vytápění a pro přípravu teplé vody).

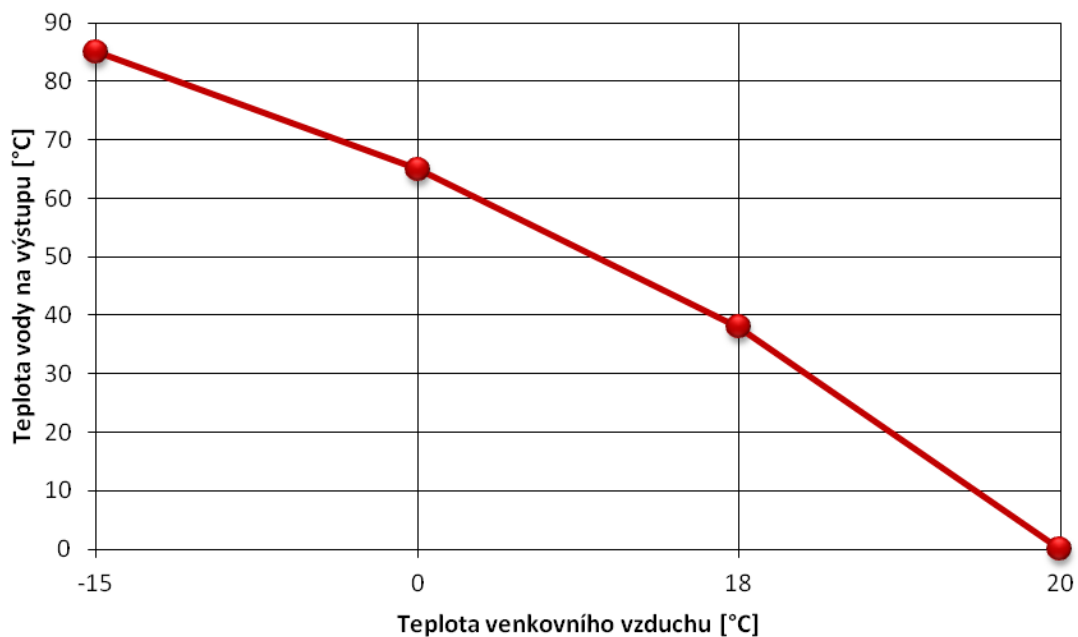
#### **Primární strana**

Přívodní i vratné potrubí je před vstupem do DPS opatřeno uzavírací armaturou. Regulační ventil osazený před deskovým výměníkem pro vytápění reguluje teplotu topné vody na maximální teplotu 80 °C a regulační ventil osazený před deskovým výměníkem pro přípravu teplé vody reguluje teplotu vody na maximální teplotu 55 °C.

#### **Sekundární strana**

Okruh za deskovým výměníkem pro ohřev teplé vody je vybaven akumulacním zásobníkem, díky kterému je zajištěna teplotní stabilita. Součástí je také cirkulační potrubí s cirkulačním čerpadlem. Před napojením cirkulačního potrubí na akumulacní zásobník je na cirkulační potrubí napojeno potrubí s přívodem studené vody, které je opatřeno vodoměrem. Součástí okruhu je pojistný ventil. Nejvýše položená místa v rozvodu teplé vody jsou opatřena odvzdušňovací nádobou. Nejnižší položená místa jsou opatřena vypouštěcími ventily.

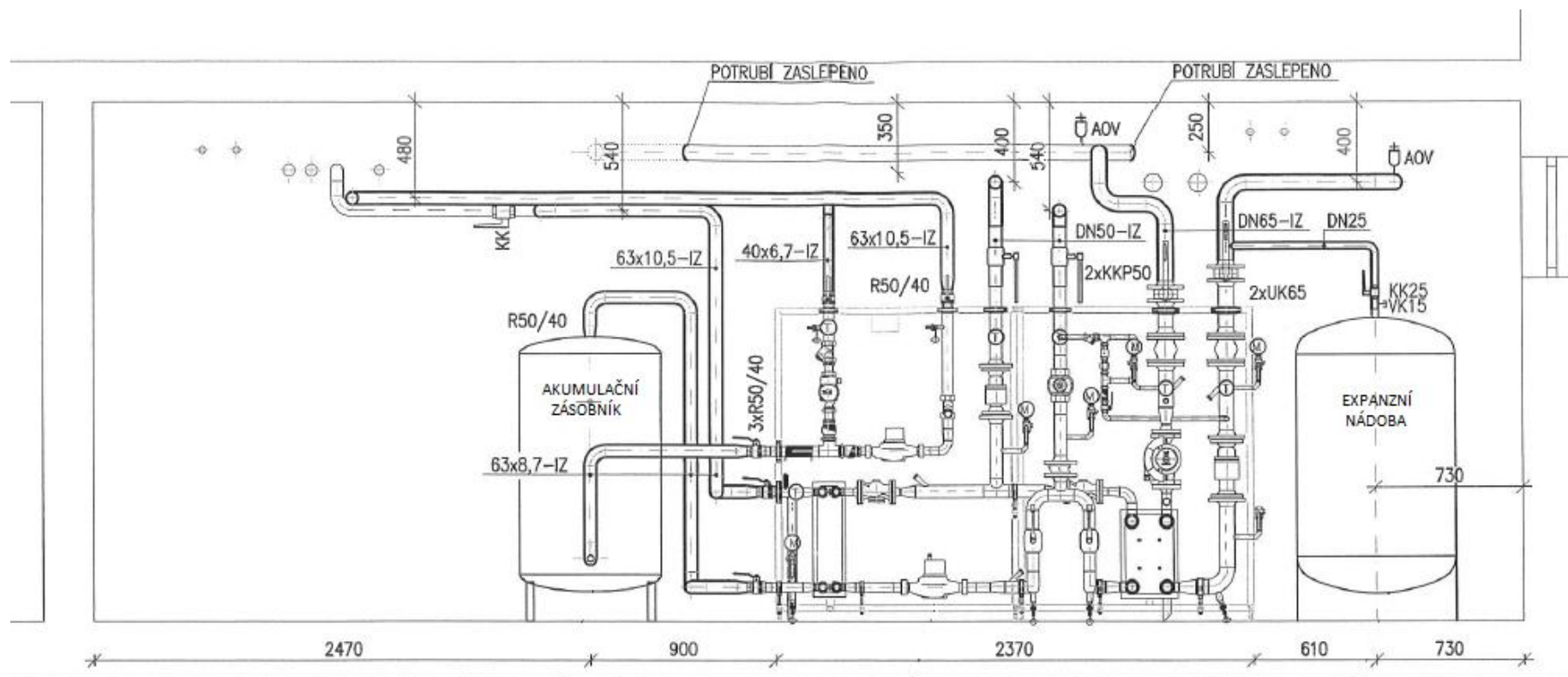
Teplota vody v okruhu za deskovým výměníkem pro vytápění je řízena ekvitermně (v závislosti na venkovní teplotě vzduchu). Ekvitermní křivka DPS je zobrazena v **Grafu 8**. Na výstupním sekundárním potrubí z deskového výměníku je osazen pojistný ventil a oběhové čerpadlo s plynulou regulací otáček. Expanzní nádoba je připojena na sekundární vratné potrubí. Doplnění vody do sekundárního okruhu pro vytápění je řešeno přes primární vratné potrubí přes filtr a kulový kohout s elektropohonem, který slouží k řízení požadovaného doplňovaného množství vody.



**Graf 8** - Ekvitermní křivka DPS

### **Měřiče tepla a množství dodané studené vody**

Měřič tepla pro ohřev teplé vody je umístěn na vratném primárním potrubí před propojením s vratným primárním potrubím pro vytápění. Měřič tepla pro vytápění je umístěn na vratném sekundárním potrubí v okruhu vytápění před napojením potrubí do deskového výměníku. Množství spotřebované studené vody v okruhu pro teplou vodu je měřeno vodoměrem.



**Obr. 31** - Typická domovní předávací stanice [21]

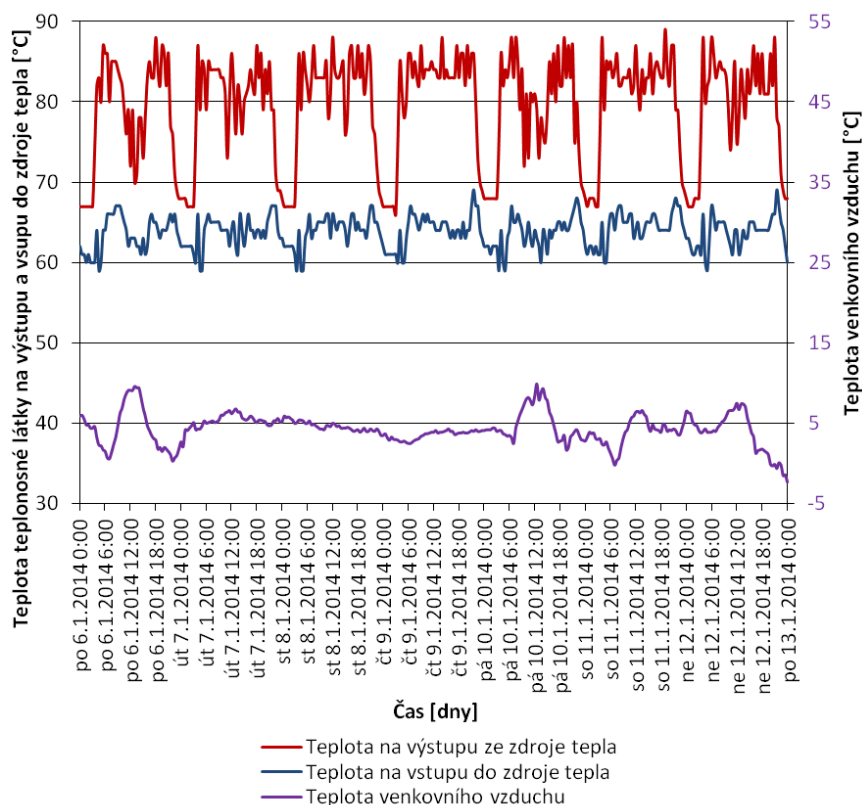
## B.4 Analýza provozních stavů tepelné sítě

Předmětem této analýzy bude provoz v zimním období (měsíc leden), v přechodném období (měsíc duben) a v období letním (měsíc červenec). Analýza se bude týkat teplot teplotnosné látky (vody) na výstupu a vstupu do zdroje tepla, objemového průtoku na hranici zdroje tepla a tepelného výkonu zdroje tepla. Měsíční průběhy jsou zobrazeny v příloze **P2**.

### B.4.1 Zimní provoz (měsíc leden)

#### Teplota teplotnosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla

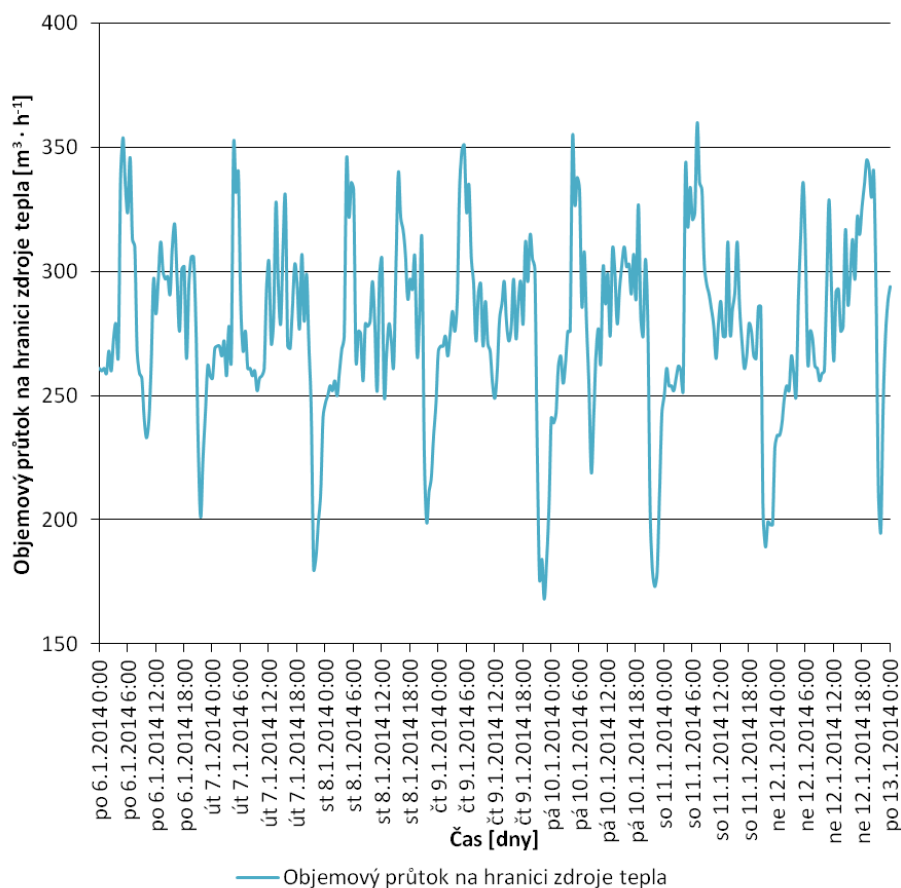
Z grafu **P2a** je patrné, že teplotní spád teplotnosné látky se v typicky zimním období pohybuje průměrně 85 / 65 °C. Také je vidět ekvitermní řízení (teplota teplotnosné látky na výstupu ze zdroje je závislá na teplotě venkovního vzduchu). Tato závislost je vidět především od 19.1. 2014 do 26.1. 2014 (teplota venkovního vzduchu klesá a teplota teplotnosné látky naopak stoupá). Také jsou viditelné teplotní útlupy v nočních hodinách, kdy dochází k poklesu teploty teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla o cca 15 °C. Dle **Grafu 9** nastává útlup od 0:00 do 6:00.



**Graf 9** - Leden - týdenní průběh teplot teplotnosné látky

### Objemový průtok na hranici zdroje tepla

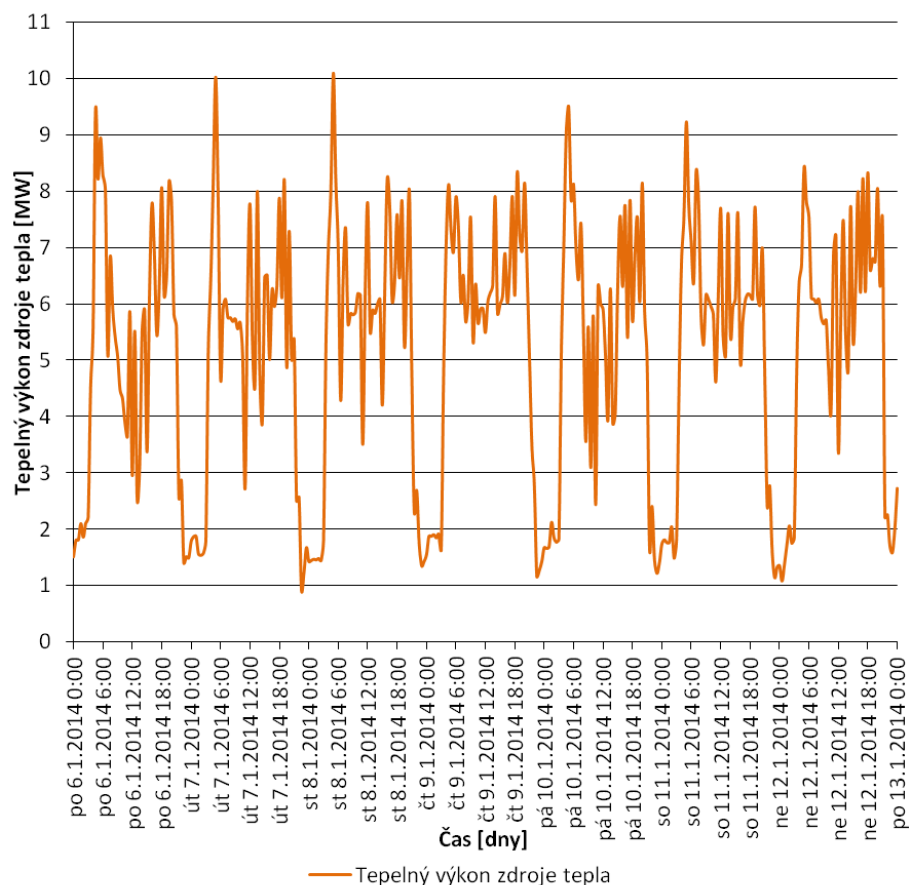
Měsíční průběh znázorňuje graf **P2b**. V zimním období se objemový průtok během dne pohybuje v rozmezí  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  až  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Dle **Grafu 10** objemový průtok opět klesá při nočním útlumu a to na hodnotu kolem  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .



**Graf 10** - Leden - týdenní průběh objemového průtoku

### Tepelný výkon zdroje tepla

Měsíční průběh je zobrazen v grafu **P2c**. Tepelný výkon zdroje tepla je závislý na teplotě teplonosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla a na objemovém průtoku. Jak již bylo zmíněno, pokles těchto parametrů nastává během nočního útlumu. Tepelný výkon v nočních hodinách také klesá. Dle **Grafu 11** nastává pokles tepelného výkonu od 0:00 do 6:00. Tento snížený výkon je využíván především pro vytápění. Od 6:00 nastává výrazný nárůst tepelného výkonu, jelikož je potřeba dodávat teplo nejen pro vytápění, ale také pro přípravu teplé vody. Po 6:00 nastává opět mírný pokles - jež není třeba výkon pro ohřev teplé vody. Po 18:00 tepelný výkon opět narůstá - navýšení tepelného výkonu pro ohřev teplé vody.



**Graf 11** - Leden - týdenní průběh tepelného výkonu

## B.4.2 Přechodné období (měsíc duben)

### Teplota teplotnosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla

Z grafu **P2d** je možné vidět ukončení otopné sezóny. Ode dne 23.4. 2017 se průběh teplot teplotnosné látky na přívodu a vratu do zdroje tepla ustálil - průběhy jsou téměř každý den stejné (teplota teplotnosné látky již není závislá na venkovní teplotě vzduchu).

### Objemový průtok na hranici zdroje tepla

Průběh znázorňuje graf **P2e**. Na začátku měsíce se objemový průtok během dne pohybuje v rozmezí  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  až  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Objemový průtok opět klesá při nočním útlumu a to na hodnotu mezi  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  až  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Ode dne 23.4. 2017 se objemový průtok během dne pohybuje téměř konstantně okolo  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . V podvečerních hodinách je objemový průtok vyšší (až  $325 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), jelikož dochází k dodávce tepla pro ohřev teplé vody (velká spotřeba teplé vody pro hygienické účely před spaním).

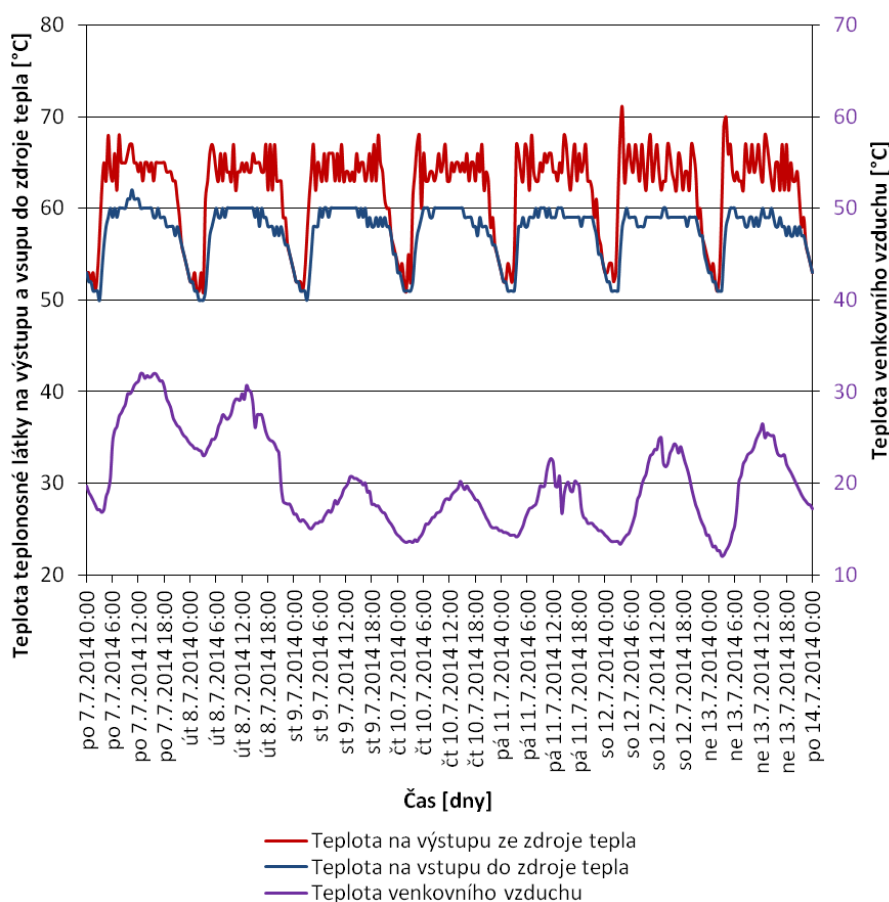
### Tepelný výkon zdroje tepla

Tento průběh je zobrazen v grafu **P2f**. Tepelný výkon zdroje tepla je opět závislý na teplotě teplotonosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla a na objemovém průtoku. Poklesy opět nastávají během nočního útlu a vyšší hodnoty nastávají při nízkých teplotách venkovního vzduchu. Od 23.4. 2017 začíná být průběh ustálený - každý den má téměř stejný průběh (tepelný výkon je již využíván pouze pro ohřev teplé vody).

### **B.4.3 Letní provoz (měsíc červenec)**

#### Teplota teplotonosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla

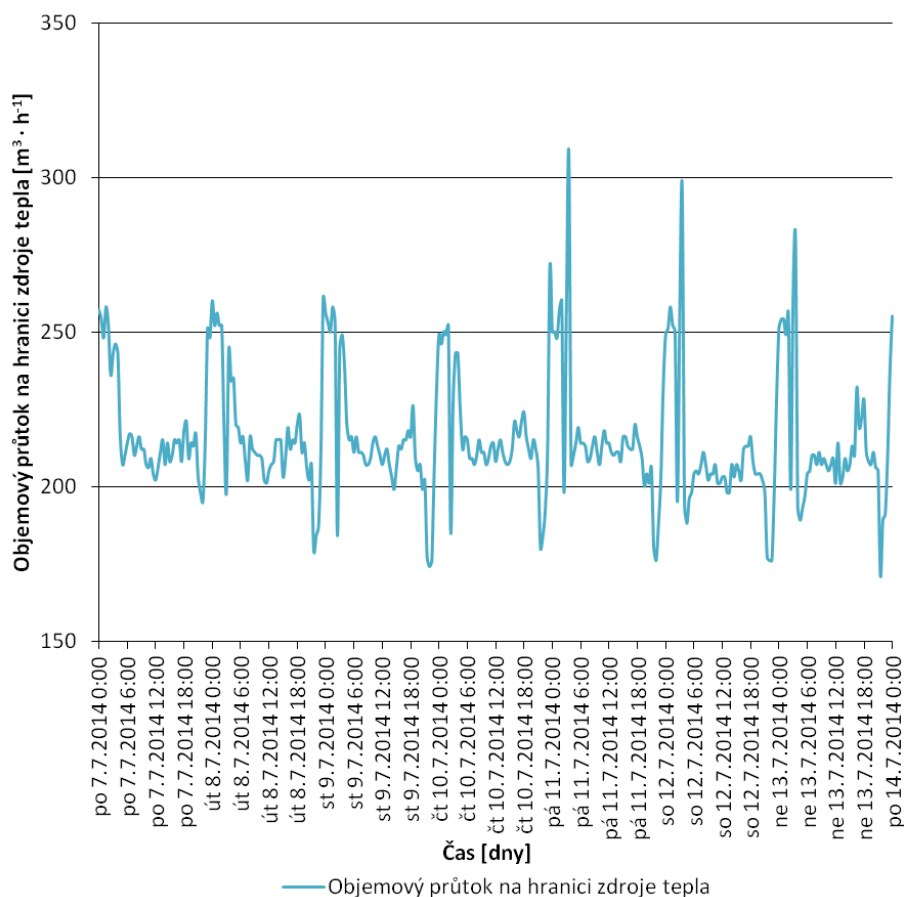
Z měsíčního grafu **P2g** je možné vidět, že jsou průběhy teplot teplotonosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla každý den stejné, jelikož teplota teplotonosné látky již není závislá na venkovní teplotě vzduchu. Teplotní spád se pohybuje přibližně 65 / 60 °C. Dle **Grafu 12** nastává útlum v době od 19:00 do 3:00.



**Graf 12 - Červenec - týdenní průběh teploty teplotonosné látky**

### Objemový průtok na hranici zdroje tepla

Měsíční průběh znázorňuje graf **P2h**. Objemový průtok se během dne pohybuje téměř konstantně okolo  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . V podvečerních a ranních hodinách je objemový průtok vyšší (až  $275 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), jelikož dochází k dodávce tepla pro ohřev teplé vody. Dle **Grafu 13** dochází ke zvýšení objemového průtoku v době od 19:00 do 3:00.

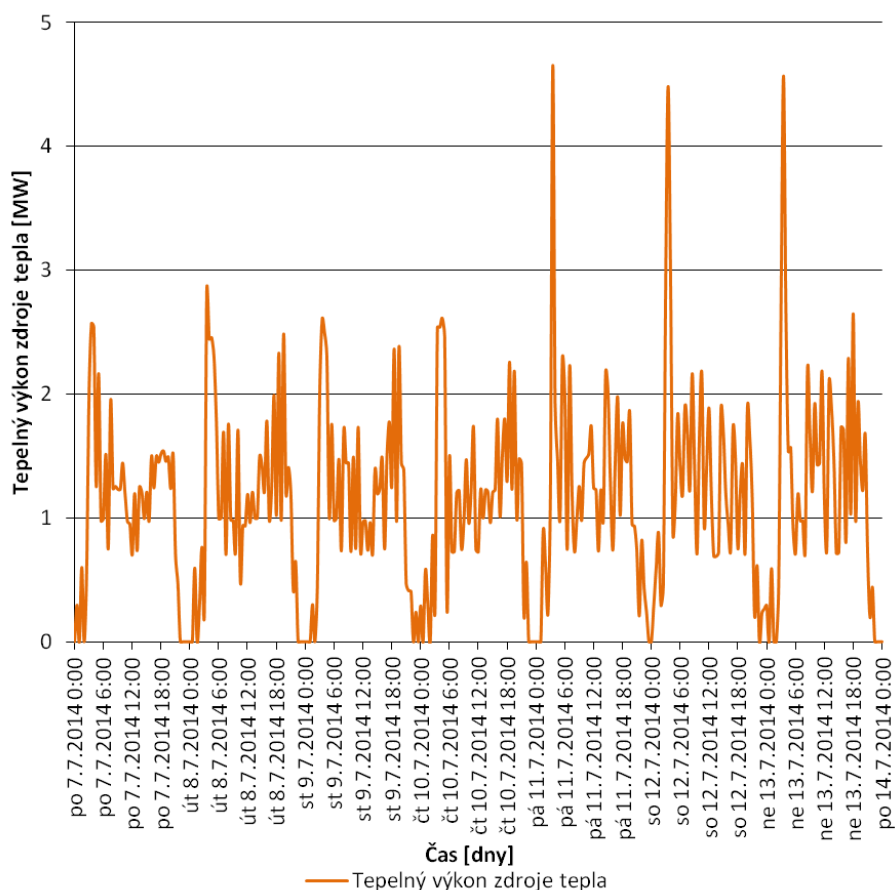


**Graf 13** - Červenec - týdenní průběh objemového průtoku

### Tepelný výkon zdroje tepla

Měsíční průběh je zobrazen v grafu **P2i**. Tepelný výkon zdroje tepla je opět závislý na teplotě teplotnosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla a na objemovém průtoku. Poklesy opět nastávají během nočního útlumu. Průběh tepelného výkonu je ustálený - každý den má téměř stejný průběh (dodané teplo je již využíváno pouze pro ohřev teplé vody). Dle **Grafu 14** nastává útlum od 19:00 do 3:00. V tomto časovém intervalu nastává oproti zimnímu období i nulový výkon zdroje tepla (není třeba dodávat žádné teplo).





**Graf 14** - Červenec - týdenní průběh tepelného výkonu

#### B.4.4 Závěrečné srovnání provozních stavů

V zimním období je teplota teplonosné látky na výstupu ze zdroje tepla řízena ekvitermně na základě venkovní teploty vzduchu. Převažující teplotní spád v tomto období činí 85 / 65 °C. V letním období již není teplota teplonosné látky na výstupu ze zdroje tepla řízena ekvitermně a převažující teplotní spád je 65 / 60 °C.

Útlumy v dodávce tepla ze zdroje tepla do spotřebních míst jsou prováděny celoročně vždy v nočních hodinách. Noční útlumy jsou energeticky výhodné.

V zimním období není potřeba dodávat v nočních hodinách teplo pro ohřev teplé vody a dodávané teplo pro vytápění bytových domů je vhodné snížit (pro zajištění kvalitnějšího spánku je vhodné snížit teplotu vzduchu v místnosti). Stejně tak pro vytápění administrativních budov, základních a mateřských škol není potřeba v nočních hodinách udržovat v pobytových zónách požadovanou hodnotu operativní teploty. Náběh v dodávce tepla musí být proveden v dostatečném časovém předstihu, aby měli pobytové zóny v době výskytu uživatelů požadované parametry vnitřního prostředí.

## B.5 Model tepelné sítě

Diagram illustrating the sequence of steps in a thermal network calculation:

- SÍŤ VODNÍ
- ZDROJ VODNÍ
- BĚŽNÝ UZEL VODNÍ
- SPOTŘEBIČ VODNÍ
- POTRUBNÍ ÚSEK VODNÍ
- VÝPOČTOVÝ MODEL TEPOVODNÍ TEPELNÉ SÍTĚ

66

### B.5.1 Zadávané okrajové podmínky (stacionární výpočet)

Oranžové podbarvení buněk v tabulkách značí fixní hodnoty. Nepodbarvené buňky značí proměnné hodnoty, které se zadávají dle provozních stavů (zima, léto, ...) nebo jsou hodnoty odlišné dle jednotlivých vodních zdrojů, vodních spotřebičů, vodních uzlů běžných a vodních potrubních úseků.

SÍŤ VODNÍ	
Výchozí maximální přetlak	10 bar
Název referenčního zdroje	Výtopna CVKV
Sezóna - interval 1 až 0 (1 - topná sezóna, 0 - letní sezóna)	...
Teplota vzduchu (pro výpočet tepelných ztrát nadzemního vedení)	... °C
Teplota zeminy (pro výpočet tepelných ztrát podzemního vedení)	... °C
HKST	550 kPa
Uzel, pro který se určuje poměr rozevření tlaků nad HKST	Výtopna CVKV
Poměr rozevření tlaků nad HKST v daném uzlu	1 (udržování konstantního tlaku ve vratu)
Požadovaný rozdíl tlaků v daném uzlu	50 kPa
Výchozí rozdíl teplot na spotřebičích	... °C
Výchozí teplota vratu na spotřebičích	... °C
Teplota doplňované vody	10 °C

ZDROJ VODNÍ	
Nadmořská výška	... m
Pořadí nasazení - interval 0; 1; 2; ... (0 - zdroj není využíván)	...
Podíl zdroje na celkovém průtoku - interval 0 až 1 (0 - zdroj není využíván)	...
Požadovaná teplota výstupu	... °C

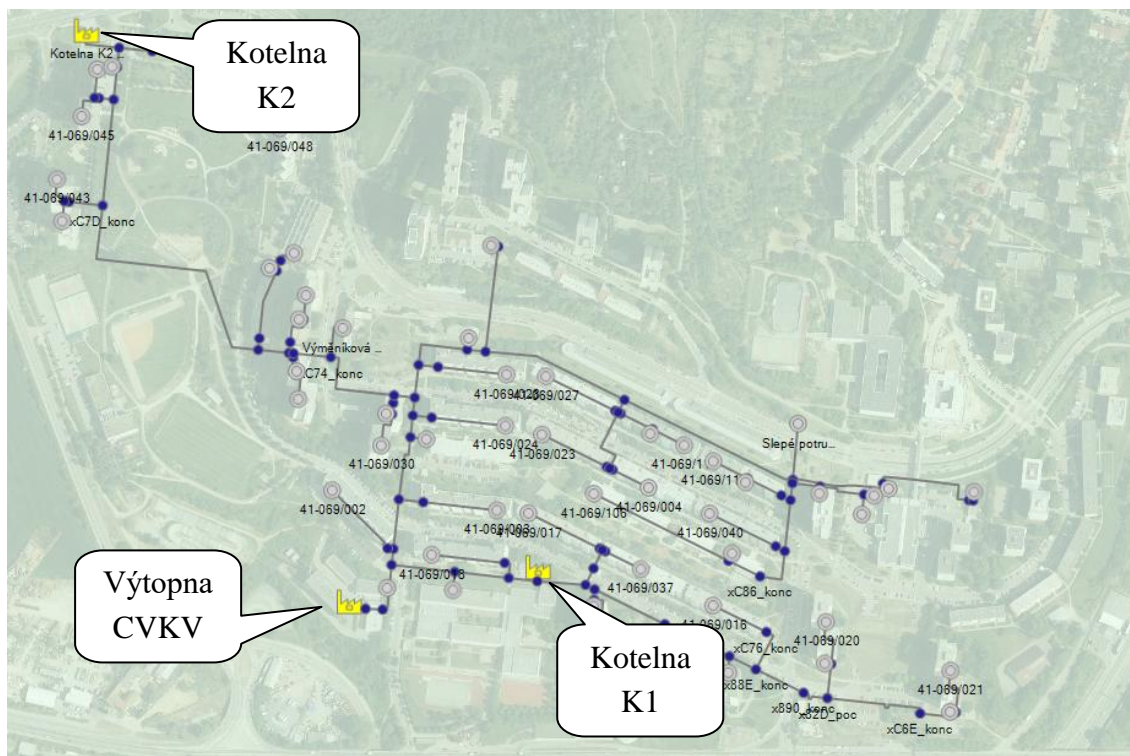
SPOTŘEBIČ VODNÍ	
Nadmořská výška	... m
Koeficient příkonu - interval 0 až 1 (0 - žádný požadovaný příkon spotřebiče)	...
Požadovaný příkon spotřebiče	... MW
Ztráta oběhové vody - interval 0 až 1 (0 - žádný podíl průtoku se ve spotřebiči neztrácí)	0

BĚŽNÝ UZEL VODNÍ	
Nadmořská výška	... m

POTRUBNÍ ÚSEK VODNÍ	
Přívod: délka	... m
Přívod: vnitřní průměr	... mm
Přívod: drsnost potrubí	... mm
Přívod: součinitel místních odporů na 1 m potrubí	... m <sup>-1</sup>
Přívod: tepelný odpor mezi teplotonosnou látkou a okolím	... m · K · W <sup>-1</sup>
Vrat: délka	... m
Vrat: vnitřní průměr	... mm
Vrat: drsnost potrubí	... mm
Vrat: součinitel místních odporů na 1 m potrubí	... m <sup>-1</sup>
Vrat: tepelný odpor mezi teplotonosnou látkou a okolím	... m · K · W <sup>-1</sup>

### B.5.2 Využívaný zdroj tepla

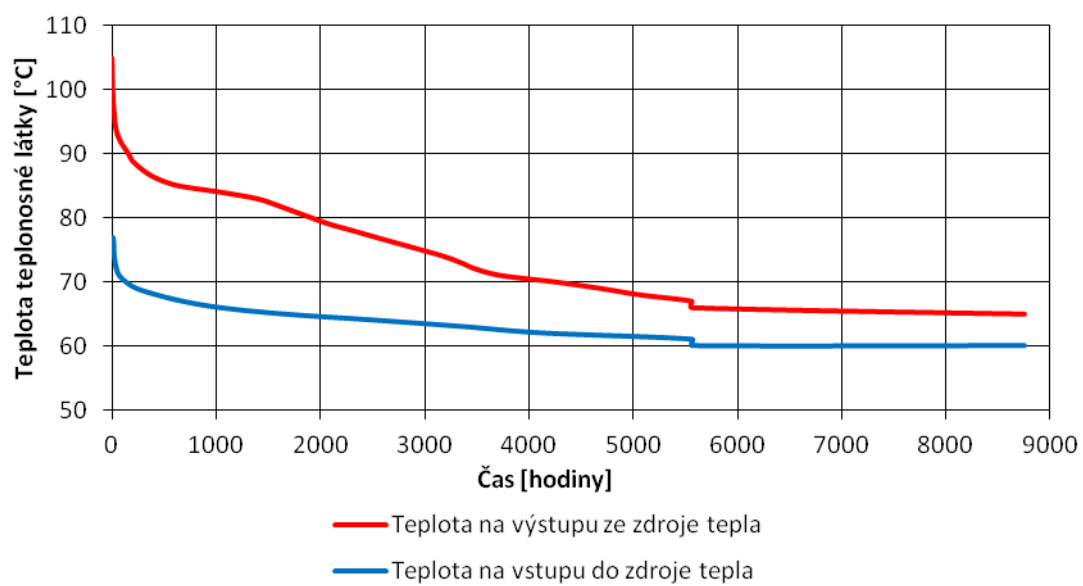
Výpočtový model obsahuje tři zdroje tepla. Záložka ZDROJ VODNÍ obsahuje tedy tři zdroje tepla. Jako jediný využívaný zdroj tepla je výtopna CVKV (pořadí nasazení = 1). Kotelny K1 a K2 nejsou v provozu (pořadí nasazení = 0 => zdroje nejsou využívány).



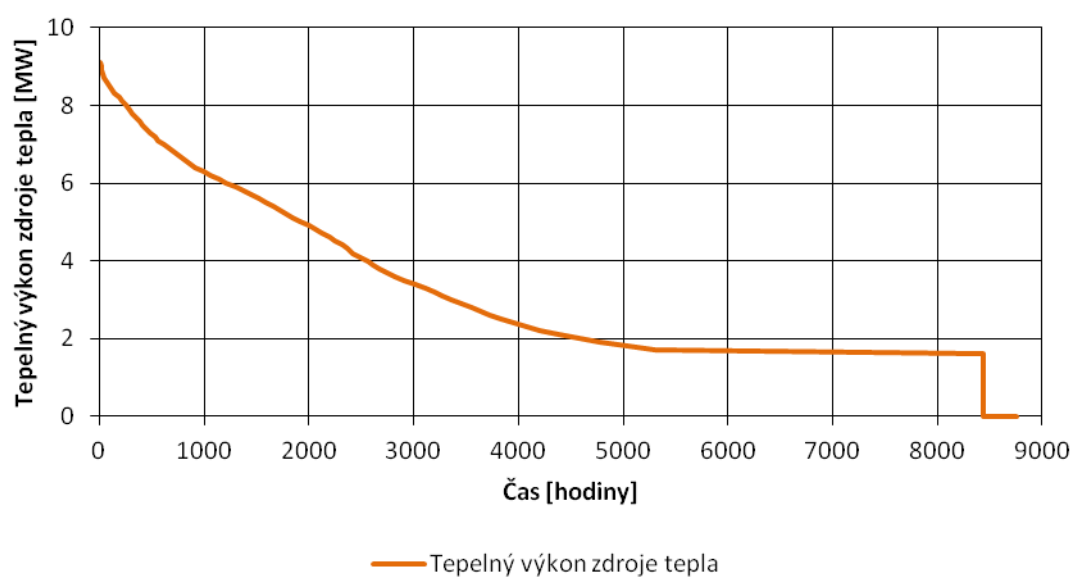
### Obr. 34 - Zdroje tepla

### B.5.3 Idealizované diagramy trvání

Diagramy trvání byly sestaveny na základě reálných dat. Následně byla provedena jejich idealizace, aby z nich bylo možné určit základní okrajové podmínky pro řešená období (teplota teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla, teplota teplotnosné látky na vstupu do zdroje tepla a tepelný výkon zdroje tepla) ve stacionárním výpočtu.



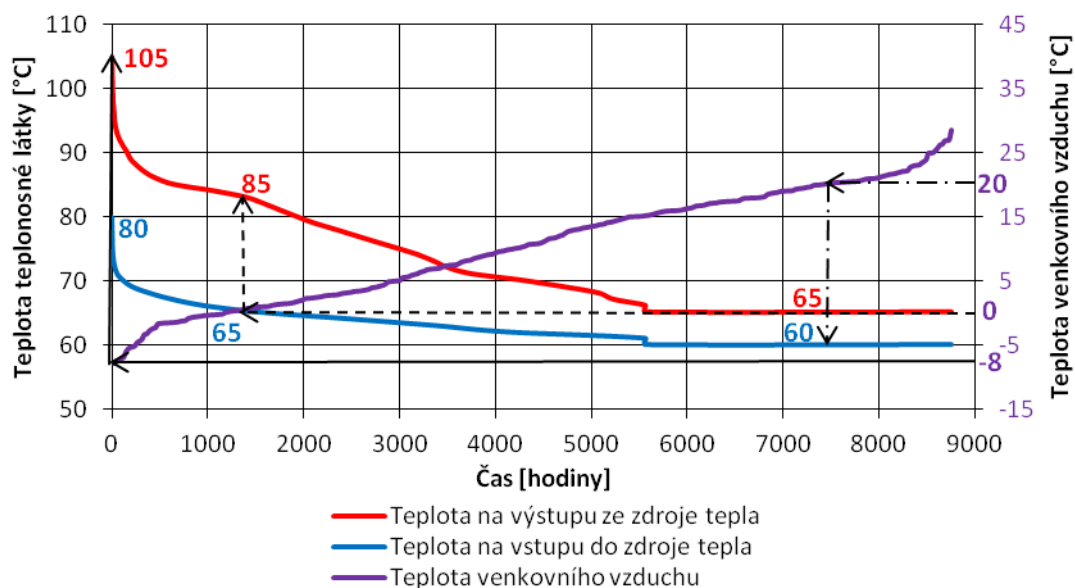
**Graf 15** - Diagram trvání teploty teplotnosné látky



**Graf 16** - Diagram trvání tepelného výkonu zdroje tepla

## B.6 Zhodnocení tlakových diagramů teplovodní tepelné sítě

Tlakové diagramy budou sestrojeny pro různé období - řezy.

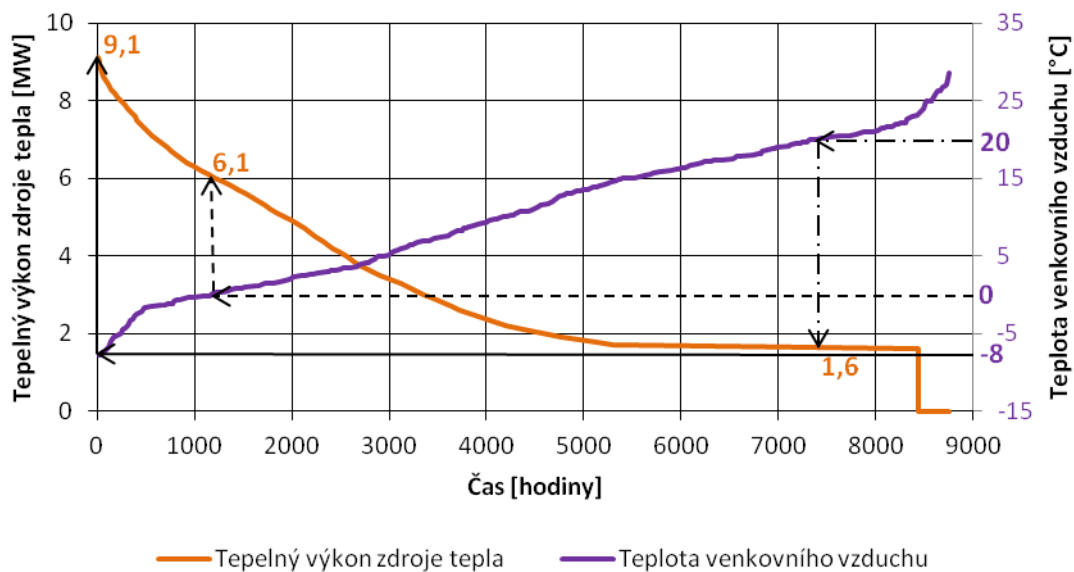


**Graf 17** - Určení teplot teplotnosné látky pro jednotlivé řezy

Řez	Teplota teplotnosné látky	
-8 °C	Teplota na výstupu ze zdroje tepla	105 °C
	Teplota na vstupu do zdroje tepla	80 °C
0 °C	Teplota na výstupu ze zdroje tepla	85 °C
	Teplota na vstupu do zdroje tepla	65 °C
20 °C	Teplota na výstupu ze zdroje tepla	65 °C
	Teplota na vstupu do zdroje tepla	60 °C

**Tab. 6** - Teplota teplotnosné látky pro jednotlivé období (řezy)



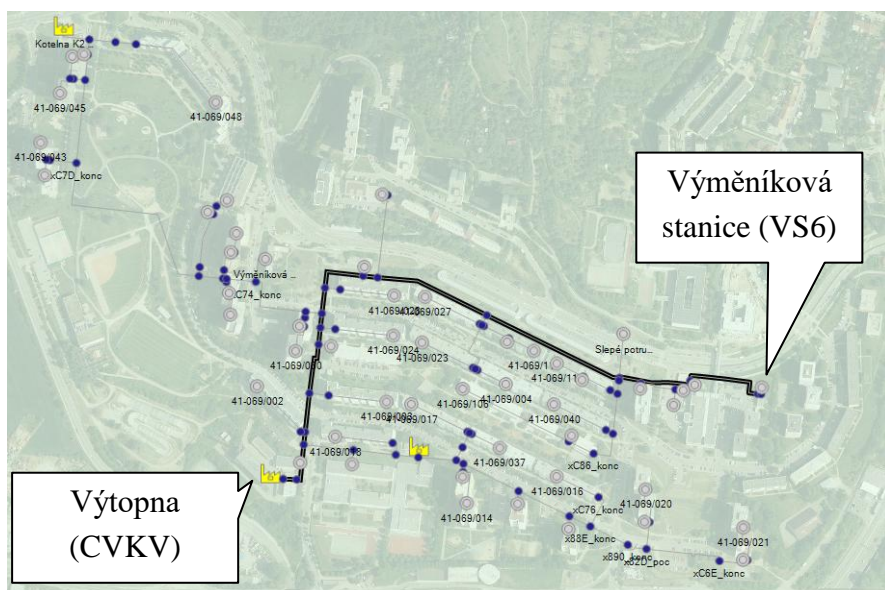


**Graf 18** - Určení tepelného výkonu zdroje tepla pro jednotlivé řezy

Řez	Tepelný výkon zdroje tepla	Sezóna
-8 °C	$= (9,1 / 9,1) \cdot 100 = 100 \%$	1
0 °C	$= (6,1 / 9,1) \cdot 100 = 65 \%$	0,67
20 °C	$= (1,6 / 9,1) \cdot 100 = 18 \%$	0,18

**Tab. 7** - Procentuální rozdělení tepelného výkonu zdroje tepla pro jednotlivé období (řezy)

Tlakový diagram je řešen pro hydraulicky hlavní větev. Jako hydraulicky hlavní větev je uvažován úsek od zdroje tepla (Výtopna CVKV) k nejvzdálenějšímu spotřebiči (Výměňíková stanice VS6).



**Obr. 35** - Znárodnění cesty pro vykreslení tlakového diagramu



### B.6.1 Řez pro zimu (-8 °C)

Sezóna	1	
Teplota vzduchu	-8 °C	
Teplota zeminy	5 °C	
HKST	550 kPa	
Nadmořská výška zdroje tepla	268 m n. m.	
Požadovaná teplota na výstupu ze zdroje	105 °C	
Výchozí teplota vratu na spotřebičích	80 °C	
Výchozí rozdíl teplot na spotřebičích	25 °C	
Teplo předané spotřebičům	8,6172 MW	
Tepelné ztráty v síti	0,4947 MW	
Celkový výkon zdroje	9,1119 MW	
Průtok na výstupu ze zdroje	295 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	
Přetlak v přívodu	664,83 kPa	335,77 m n. m.
Přetlak ve vratu	550,00 kPa	324,07 m n. m.
Rozdíl tlaků	114,83 kPa	11,70 m

**Tab. 8** - Výstup hodnot: Řez pro zimu (-8 °C)

Konstrukce tlakového diagramu pro tento řez je zobrazena v grafu **P3a** v příloze **P3**. Oběhové čerpadlo musí překonat dopravní výšku 11,70 m (rozdíl mezi přetlakem v přívodu a vratu na hranici zdroje tepla) a musí zajistit objemový průtok o hodnotě 295 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. Průběhy přetlaku v přívodu a vratu jsou zobrazeny v již zmiňovaném grafu **P3a**. Graf dále zobrazuje průběhy maximálního dovoleného přetlaku v přívodním a vratném potrubí (při překročení může dojít k poškození potrubí). Také jsou zobrazeny průběhy přetlaku odparu v přívodním a vratném potrubí (při poklesu pod tuto hodnotu nastane v potrubí odpar, který může zapříčinit kavitaci).

### B.6.2 Řez pro zimu (0 °C)

Sezóna	0,67	
Teplota vzduchu	0 °C	
Teplota zeminy	5 °C	
HKST	550 kPa	
Nadmořská výška zdroje tepla	268 m n. m.	
Požadovaná teplota na výstupu ze zdroje	85 °C	
Výchozí teplota vratu na spotřebičích	65 °C	
Výchozí rozdíl teplot na spotřebičích	20 °C	
Teplo předané spotřebičům	5,7735 MW	
Tepelné ztráty v síti	0,3945 MW	
Celkový výkon zdroje	6,1680 MW	
Průtok na výstupu ze zdroje	248 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	
Přetlak v přívodu	645,98 kPa	333,85 m n. m.
Přetlak ve vratu	550,00 kPa	324,07 m n. m.
Rozdíl tlaků	95,98 kPa	9,78 m

**Tab. 9** - Výstup hodnot: Řez pro zimu (0 °C)

Konstrukce tlakového diagramu pro tento řez je zobrazena v grafu **P3b** v příloze **P3**. Oběhové čerpadlo musí oproti řezu pro -8 °C překonat dopravní výšku nižší. Její hodnota činí 9,78 m. Také potřebná hodnota objemového průtoku je nižší. Jeho hodnota činí 248 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. V grafu **P3b** jsou opět zobrazeny průběhy přetlaku, maximálního přetlaku a přetlaku odparu pro přívodní i vratné potrubí. Jejich význam je již popsán v **kap. B.6.1**.

### B.6.3 Řez pro léto (20 °C)

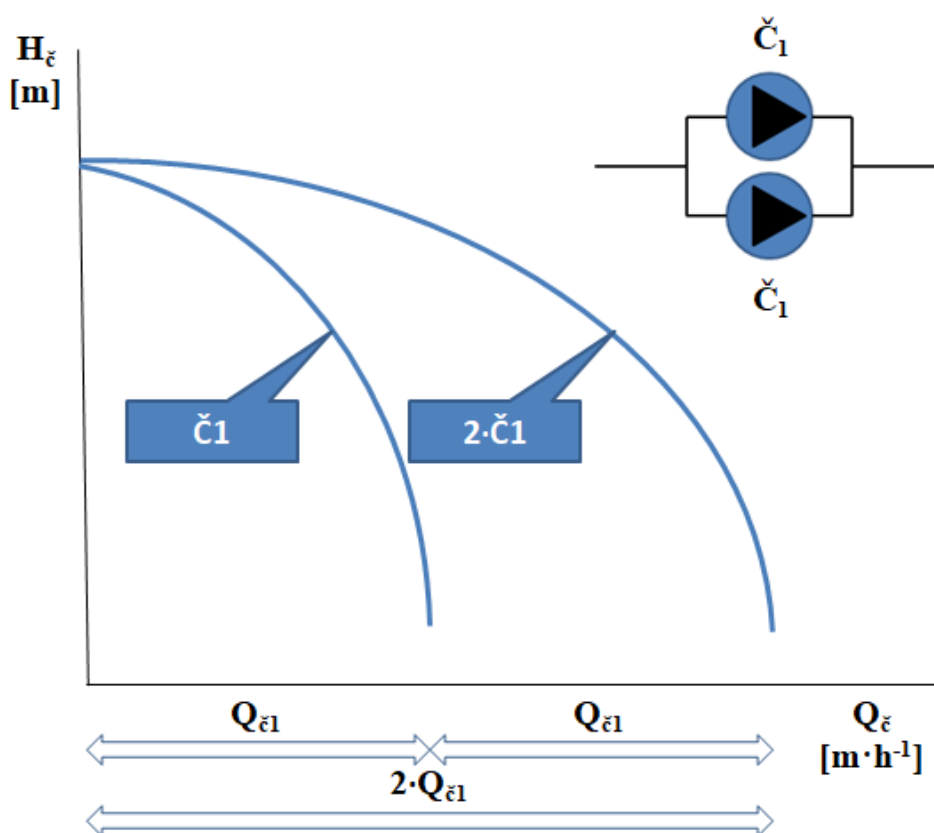
Sezóna	0,18	
Teplota vzduchu	20 °C	
Teplota zeminy	10 °C	
HKST	550 kPa	
Nadmořská výška zdroje tepla	268 m n. m.	
Požadovaná teplota na výstupu ze zdroje	65 °C	
Výchozí teplota vratu na spotřebičích	60 °C	
Výchozí rozdíl teplot na spotřebičích	5 °C	
Teplo předané spotřebičům	1,5511 MW	
Tepelné ztráty v síti	0,3006 MW	
Celkový výkon zdroje	1,8517 MW	
Průtok na výstupu ze zdroje	267 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	
Přetlak v přívodu	656,64 kPa	334,94 m n. m.
Přetlak ve vratu	550,00 kPa	324,07 m n. m.
Rozdíl tlaků	106,64 kPa	10,87 m

**Tab. 10** - Výstup hodnot: Řez pro léto (20 °C)

Konstrukce tlakového diagramu pro tento řez je zobrazena v grafu **P3c** v příloze **P3**. Oběhové čerpadlo musí oproti řezu pro -8 °C překonat dopravní výšku nižší, ale oproti řezu pro 0 °C vyšší. Její hodnota činí 10,87 m. Také potřebná hodnota objemového průtoku je nižší než pro řez -8 °C, ale vyšší než pro řez 0 °C. Jeho hodnota činí 267 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. V grafu **P3c** jsou opět zobrazeny průběhy přetlaku, maximálního přetlaku a přetlaku odparu pro přívodní i vratné potrubí. Jejich význam je již popsán v **kap. B.6.1**.

### B.6.4 Závěrečné srovnání tlakových diagramů pro jednotlivé řezy

Výstupní hodnoty, které určují průběhy tlakových diagramů, jsou nejvíce ovlivněny celkovým výkonem zdroje tepla a teplotou teplotonosné látky na jeho vstupu a výstupu. Průtok se následně dopočítá na principu kalorimetrické rovnice. Pro stanovení tlakových diagramů byl využit stacionární výpočet a pro výstupy jednotlivých období byla pevně zadána kritéria. Čerpací práce oběhových čerpadel jsou ve skutečnosti při provozu tepelné sítě proměnné. Čerpadla ve výtopně CVKV jsou zapojena paralelně (vedle sebe). Paralelní zapojení dvou stejných čerpadel zdvojnásobí objemový průtok a měrná energie zůstává neměnná.



Obr. 36 - Paralelní zapojení dvou stejných čerpadel

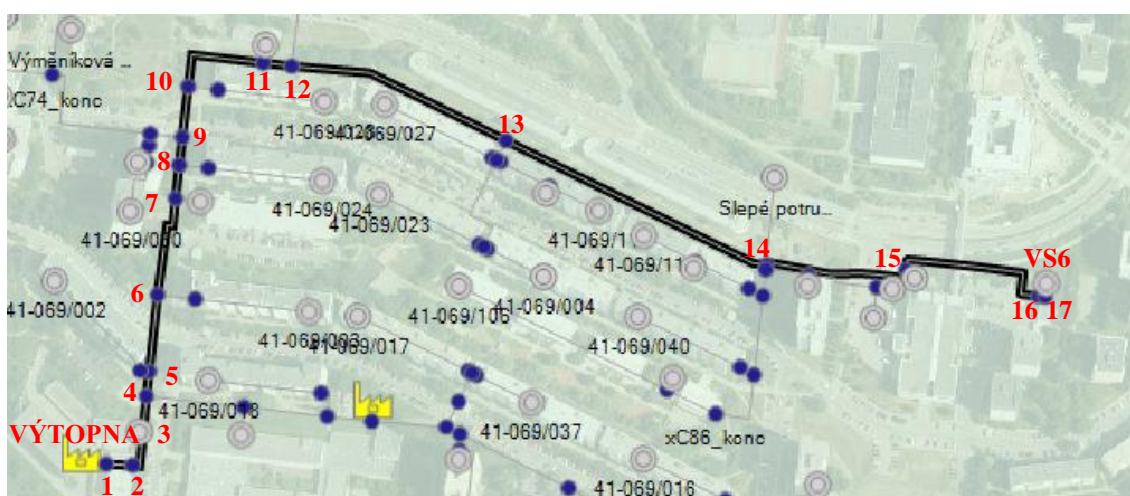
Jedno čerpadlo překoná výšku 24 m a vyvodí přitom průtok 195 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. Při paralelním zapojení dvou těchto čerpadel se průtok zdvojnásobí. Čerpadla a jejich způsob zapojení čerpacím pracím pro jednotlivá řešená období vyhovují.

## B.7 Srovnání tepelně - hydraulických výpočtů

Mezi výstupy softwaru MOP nepatří jen grafické znázornění tlakových diagramů, ale také spousta tepelně - hydraulických veličin. Cílem je srovnání výstupů ze softwaru MOP s vlastním výpočtem dle vztahů uvedených v **kapitole A** této diplomové práce.

Grafické znázornění výpočtů se bude týkat hydraulicky hlavní větve (tedy cesty pro určení tlakového diagramu). Výpočet bude proveden pouze pro zimní řez (- 8 °C).

Princip výpočtu se bude vztahovat pouze k úseku VÝTOPNA - 1 (přívodní potrubí).

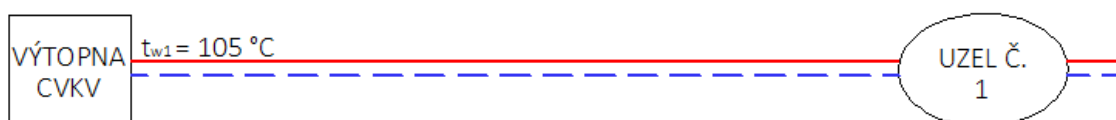


Obr. 37 - Označení řešených úseků

### B.7.1 Tepelné výpočty

#### Teplota počátečního uzlu:

Teplota počátečního uzlu je u přívodního potrubí 105 °C. Teplota následujícího uzlu je snížena o tepelné ztráty potrubí v daném úseku.



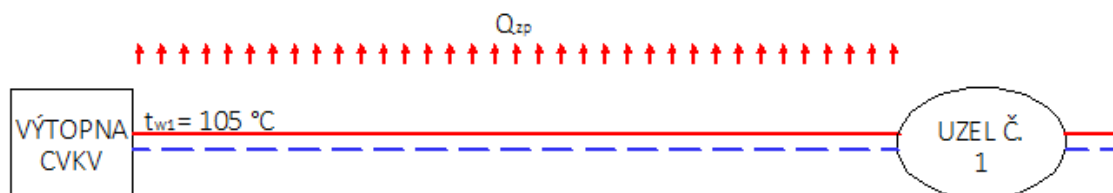
Obr. 38 - Schéma pro určení teploty počátečního uzlu

### Tepelné ztráty potrubí:

Jelikož je znám tepelný odpor potrubí ( $\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ) je možné dopočítat tepelnou ztrátu potrubí v daném úseku dle vztahu (1.27).

$$Q_{zp} = \frac{1}{R_p} \cdot l_p \cdot t_{w1} \quad [\text{W}] \quad (1.27)$$

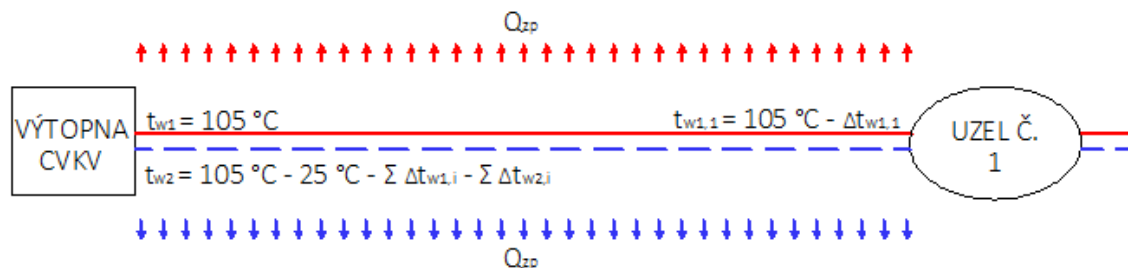
$Q_{zp}$	tepelná ztráta potrubí [W]
$R_p$	tepelný odpor potrubí [ $\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]
$l_p$	délka potrubí [m]
$t_{w1}$	teplota kapaliny - vody v počátečním uzlu potrubí [ $^{\circ}\text{C}$ ]



Obr. 39 - Schéma pro určení tepelné ztráty

### Hmotnostní průtok:

Výpočet je proveden dle vztahu 1.12 v kapitole A.4.3, měrná tepelná kapacita, která vstupuje do výpočetního vztahu, je vypočtena dle vztahu 1.2 v kapitole A.4.1. Výstupní teplota ze zdroje tepla ( $t_{w1}$ ) je uvažována 105  $^{\circ}\text{C}$ . Teplota na vstupu do zdroje tepla ( $t_{w2}$ ) je uvažována 80  $^{\circ}\text{C}$ . Ochlazení v nejvzdálenějším spotřebiči je o 25  $^{\circ}\text{C}$ . Vlivem tepelných ztrát nebude  $t_{w2} = 80^{\circ}\text{C}$ , ale hodnota bude nižší. Pro výpočet hmotnostního průtoku je se sníženou hodnotou uvažováno. Teplota  $t_{w2} = \text{cca } 78^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 40 - Schéma pro určení objemového průtoku

### **Ochlazení:**

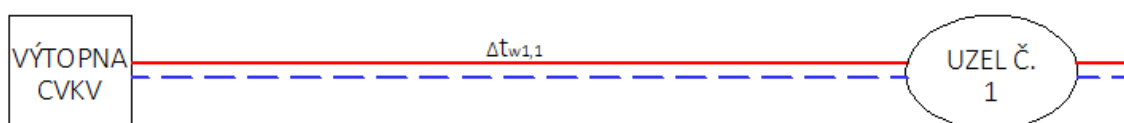
Ochlazení teplotnosné látky mezi počátečním a koncovým uzlem lze vypočítat dle upravené kalorimetrické rovnice. Výpočetní vztah je uveden v (1.28).

$$\Delta t_{w1,1} = \frac{Q_{zp}}{m_{w1,1} \cdot c_{w1}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.28)$$

$Q_{zp}$  tepelná ztráta potrubí [W]

$m_{w1,1}$  hmotnostní průtok v řešeném úseku [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

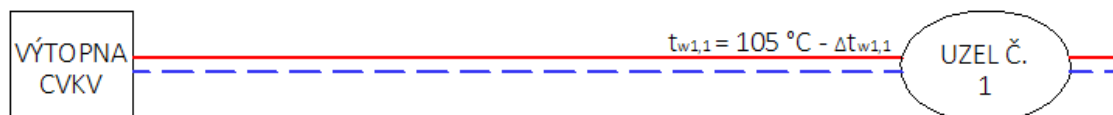
$c_{w1}$  měrná tepelná kapacita teplotnosné látky v počátečním uzlu [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]



Obr. 41 - Schéma pro určení ochlazení

### **Teplota koncového uzlu:**

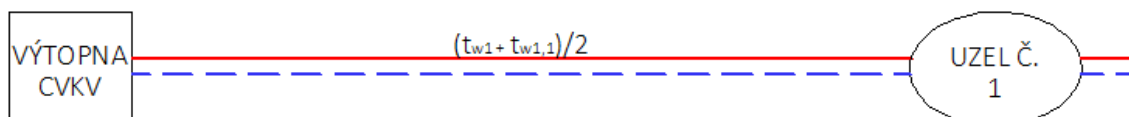
Tato teplota teplotnosné látky se určí jako rozdíl teploty v počátečním uzlu a ochlazení.



Obr. 42 - Schéma pro určení teploty koncového uzlu

### **Střední teplota:**

Tato teplota je určena jako střední hodnota mezi teplotou počátečního a koncového uzlu.

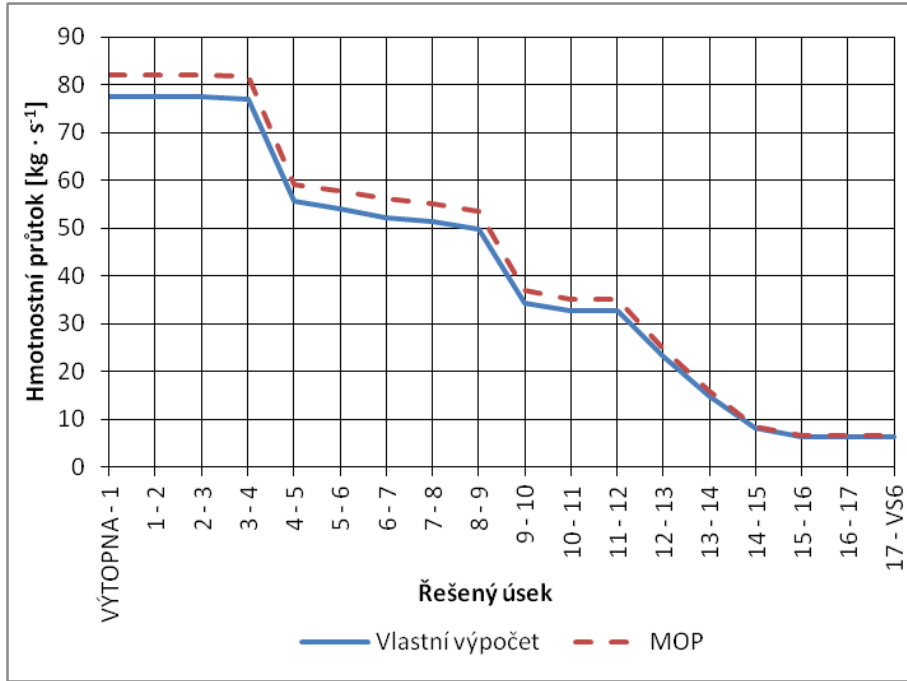
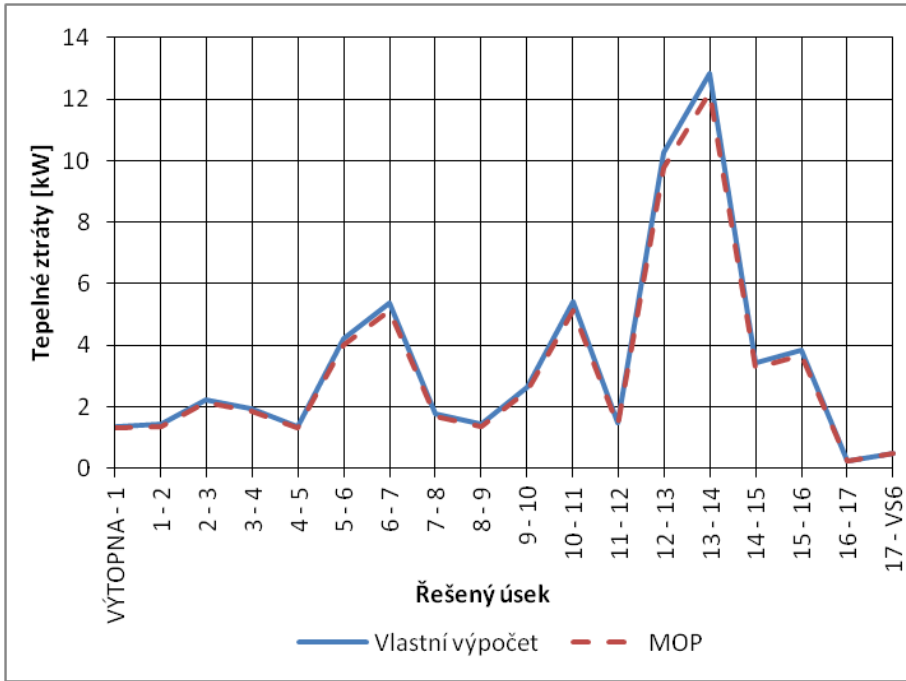
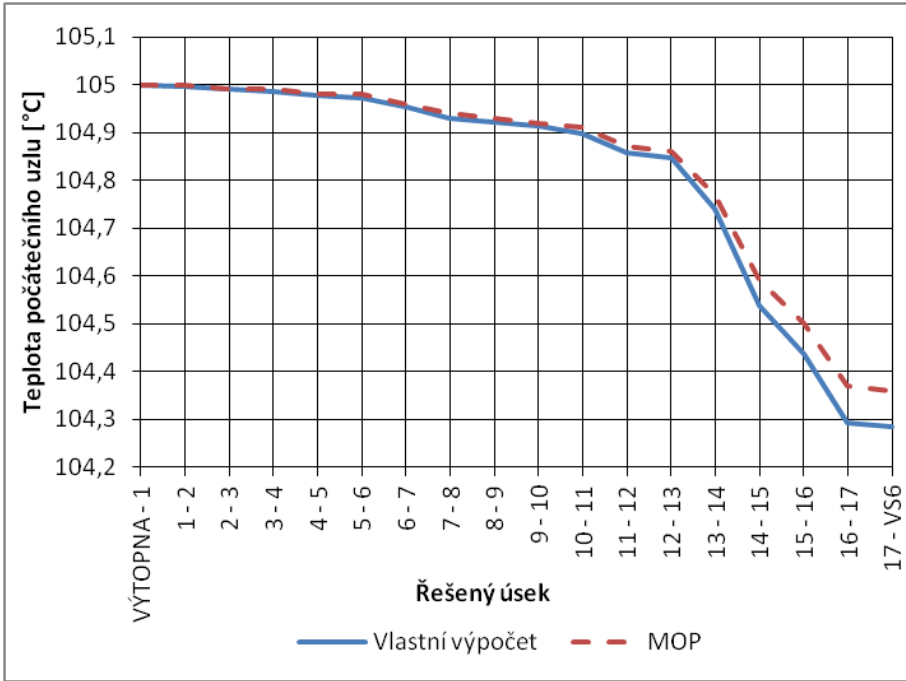


Obr. 43 - Schéma pro určení střední teploty

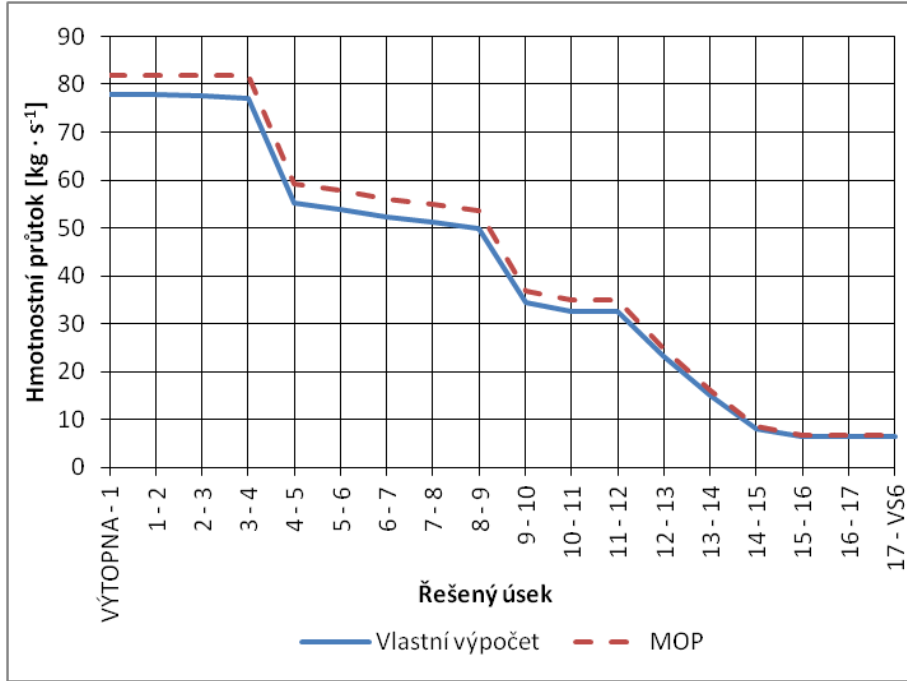
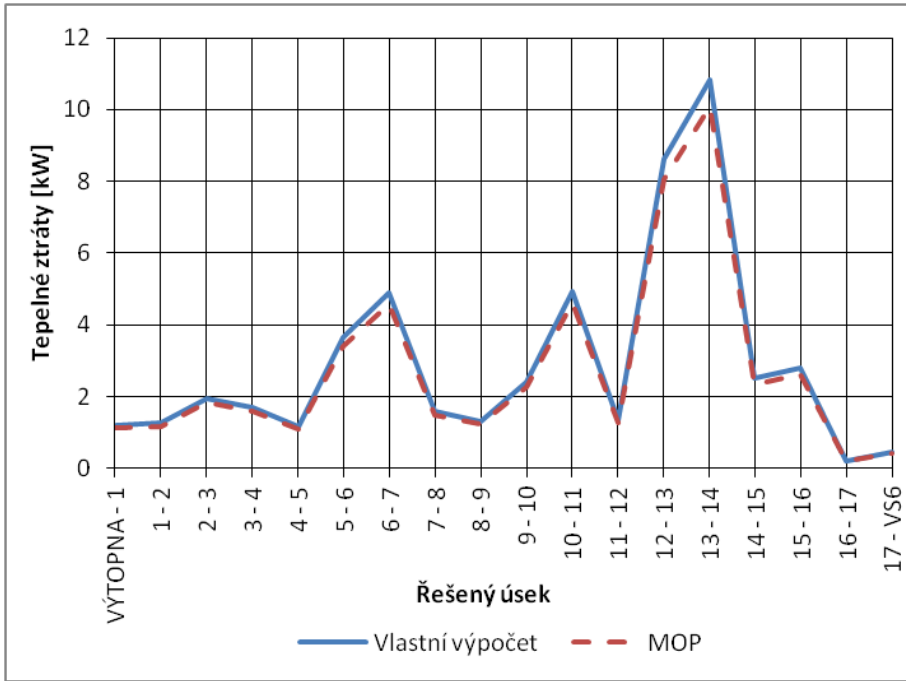
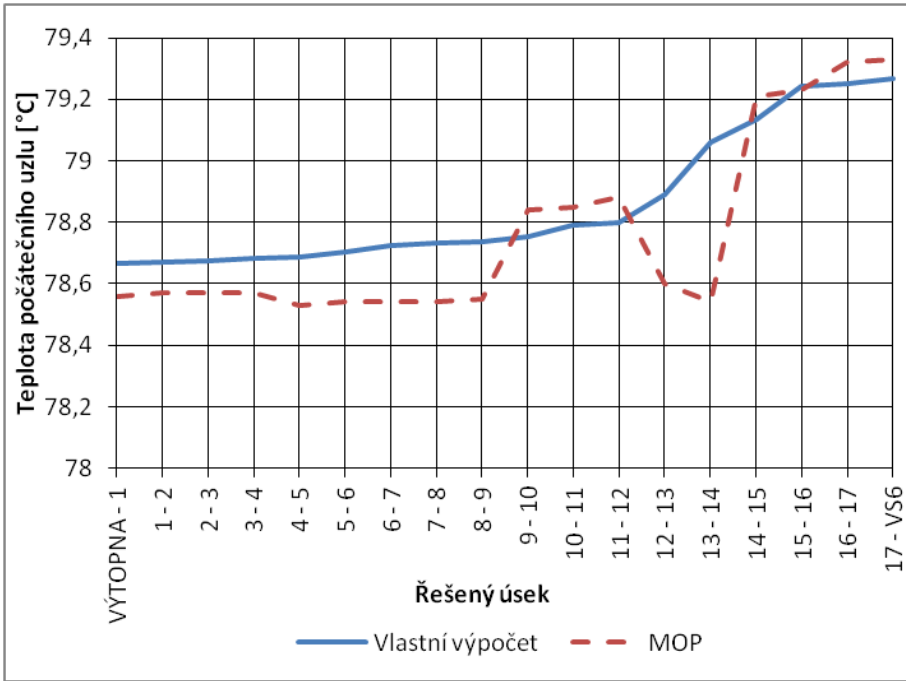
### **Střžení měrná hmotnost:**

Výpočet je proveden dle vztahu 1.1 v kapitole A.4.1.

**Přívod**

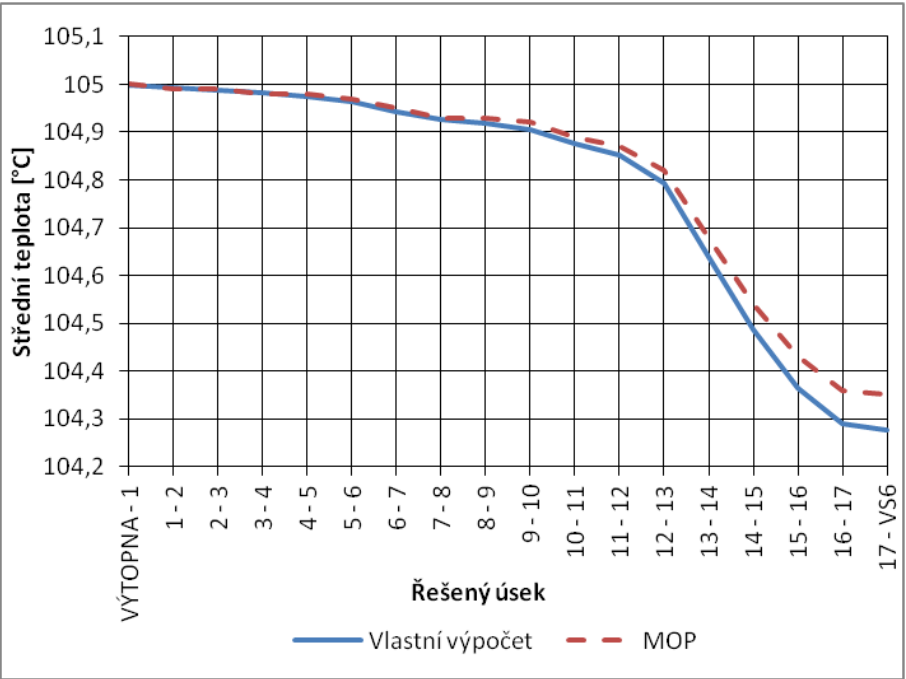
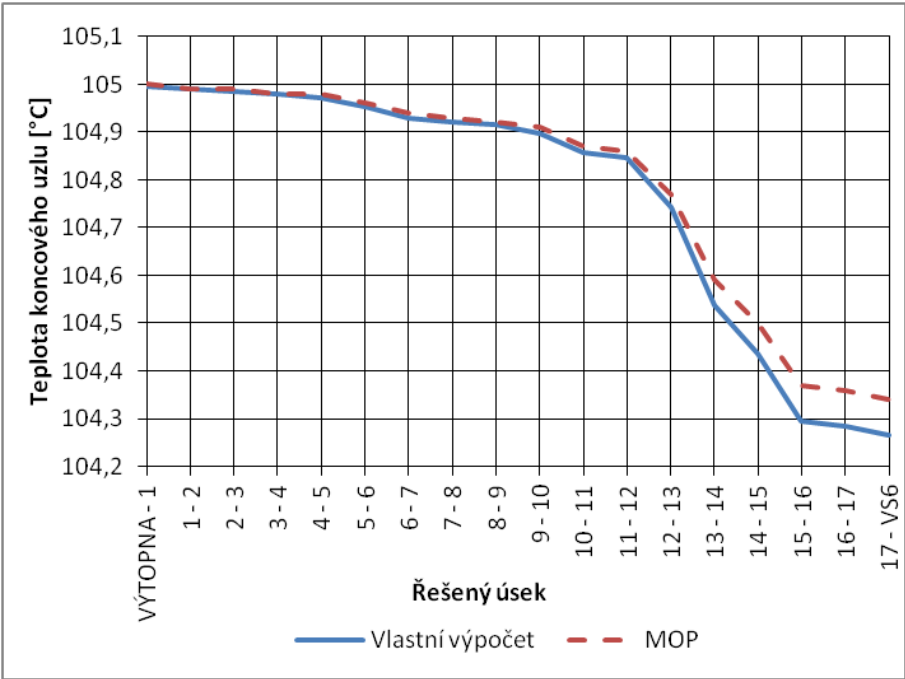
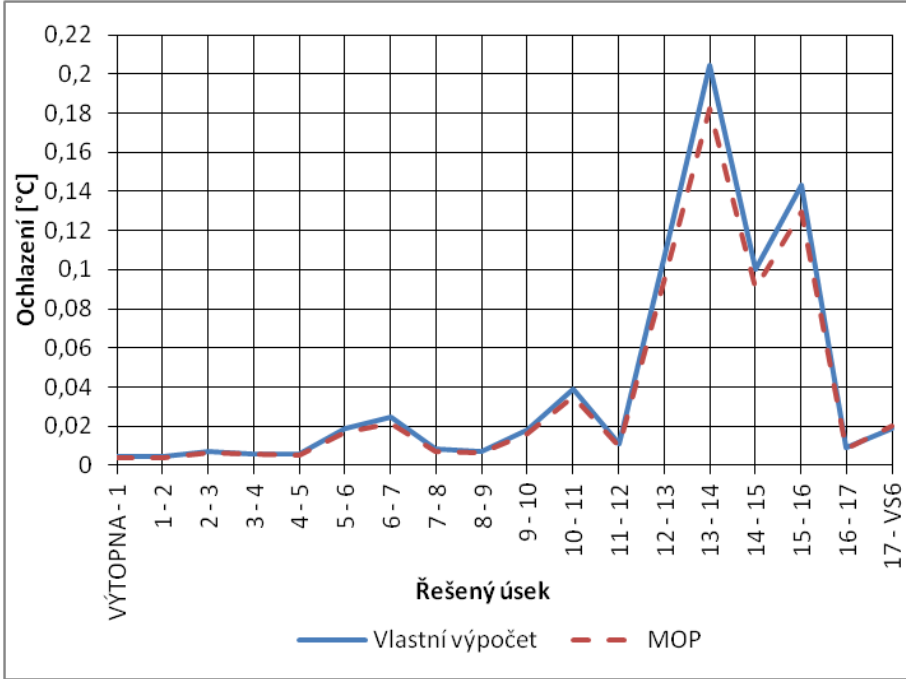


**Vrat:**

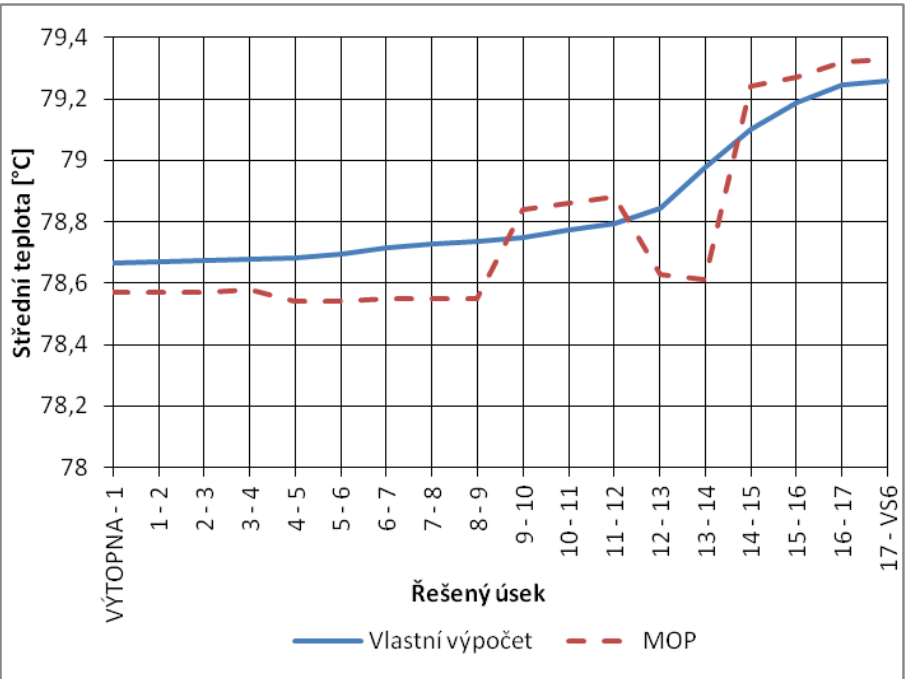
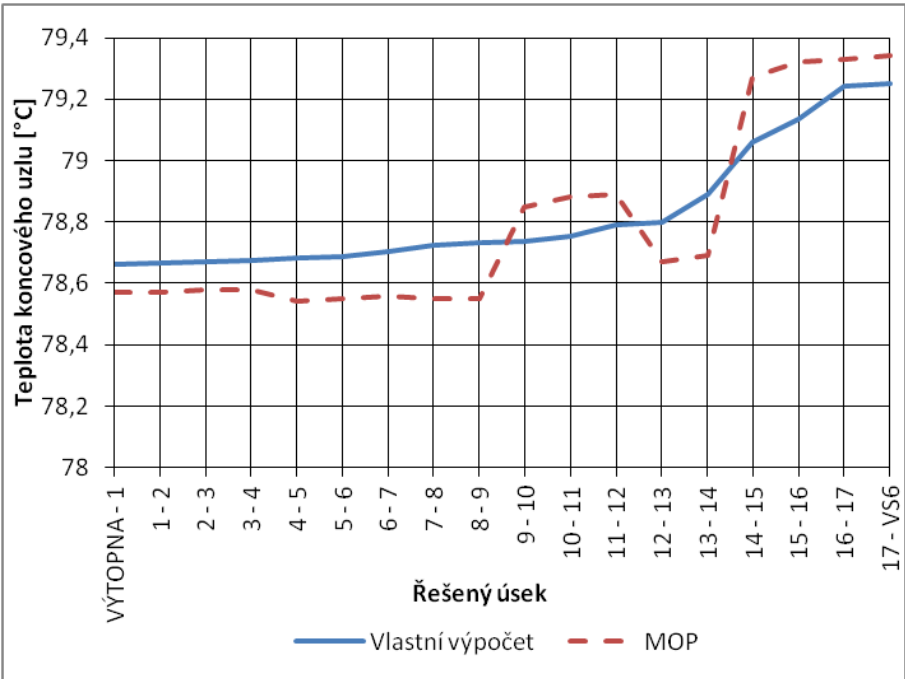
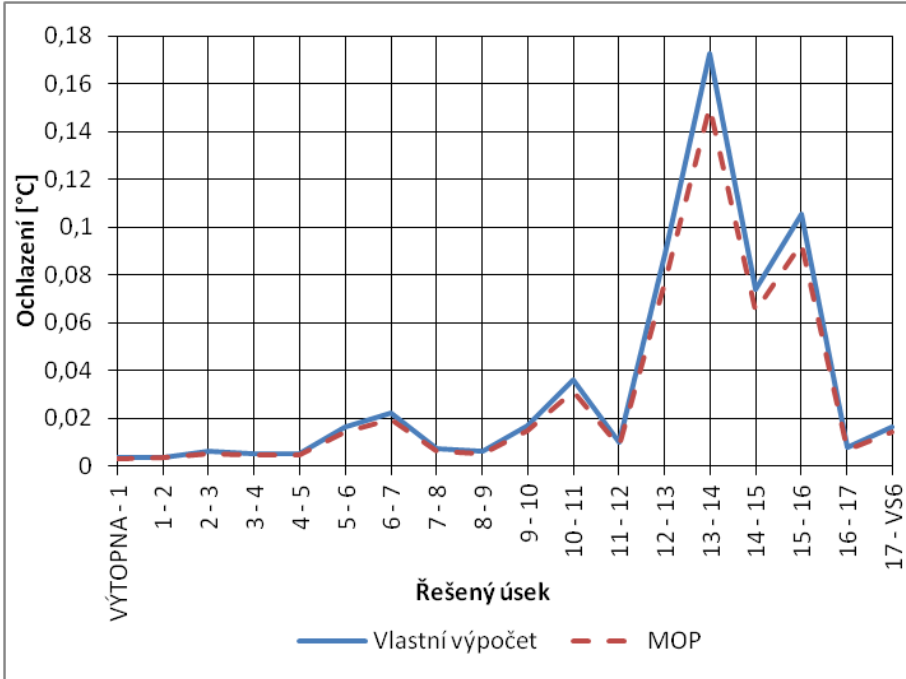




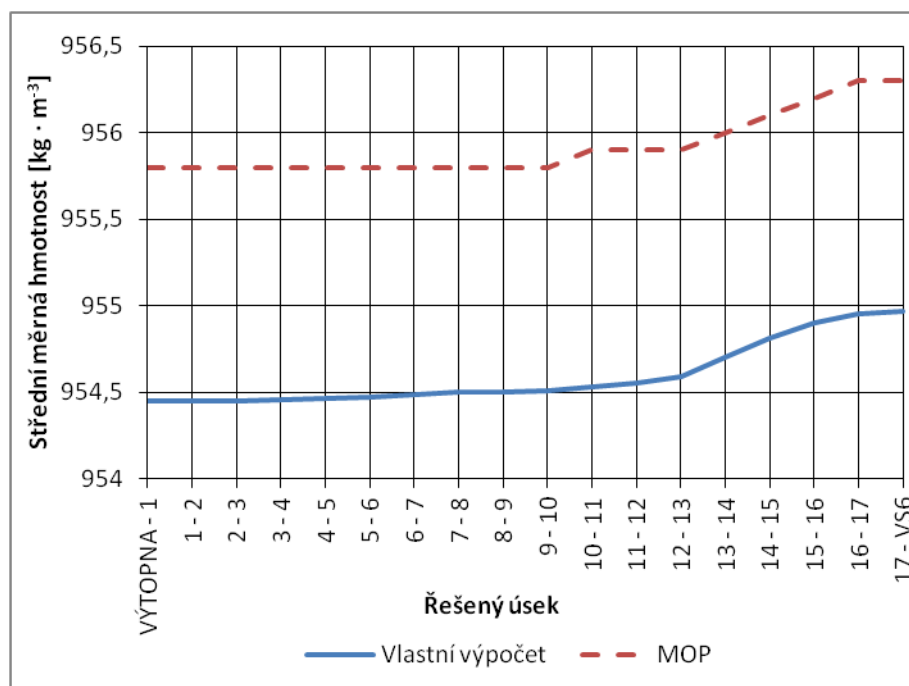
**Prívod**



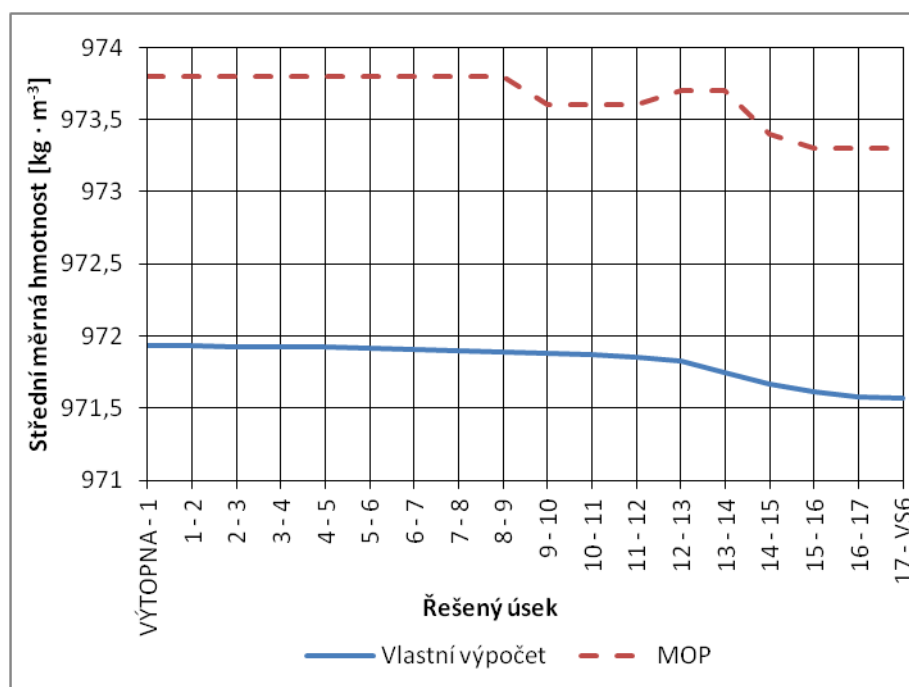
**Vrat:**



### Přívod:



### Vrat:



## **B.7.2 Hydraulické výpočty**

### **Hmotnostní průtok:**

Již řešen v tepelném výpočtu v kapitole B.7.1.

### **Střední rychlost:**

Vyjádření střední rychlosti ze vztahu 1.9 uvedeném v kapitole A.4.3.

### **Střední Reynoldsovo číslo:**

Výpočet proveden dle vztahu 1.17 uvedeném v kapitole A.4.6.

### **Tlaková ztráta třením:**

Drsnost stěny potrubí je určena dle Tab. 3 v kapitole A.4.7.1  $k_p = 0,2$  mm (pro předizolované potrubí  $k_p = 0,1$  mm). Poměrná drsnost potrubí je stanovena dle vztahu 1.24 uvedeném v kapitole A.4.7.1. Součinitel tření je stanoven dle Moodyho vztahu, uvedeném v Tab. 5 v kapitole A.4.7.1. Tlaková ztráta třením je určena dle vztahu 1.22 v kapitole A.4.7.1.

### **Tlaková ztráta místními odpory:**

Jelikož se jedná o hydraulicky dlouhé potrubí, je tlaková ztráta místními odpory stanovena na základě součinitele místních odporů na 1 m potrubí.

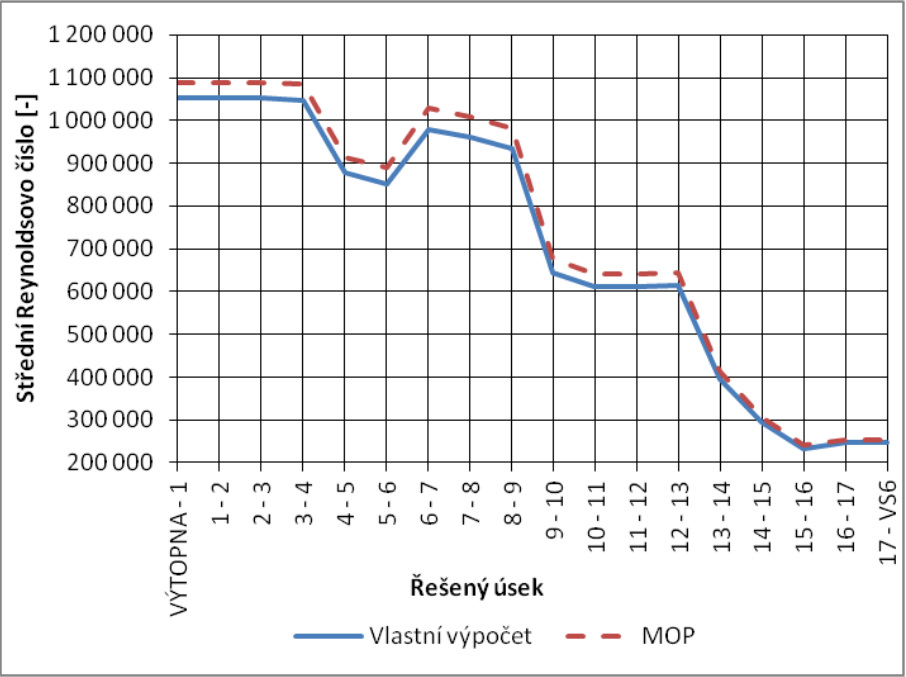
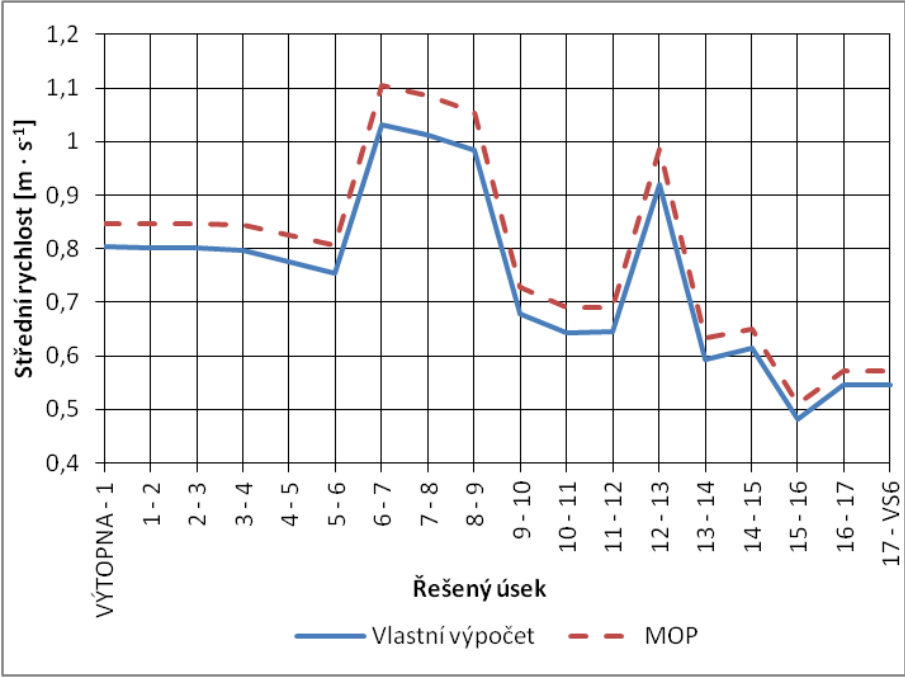
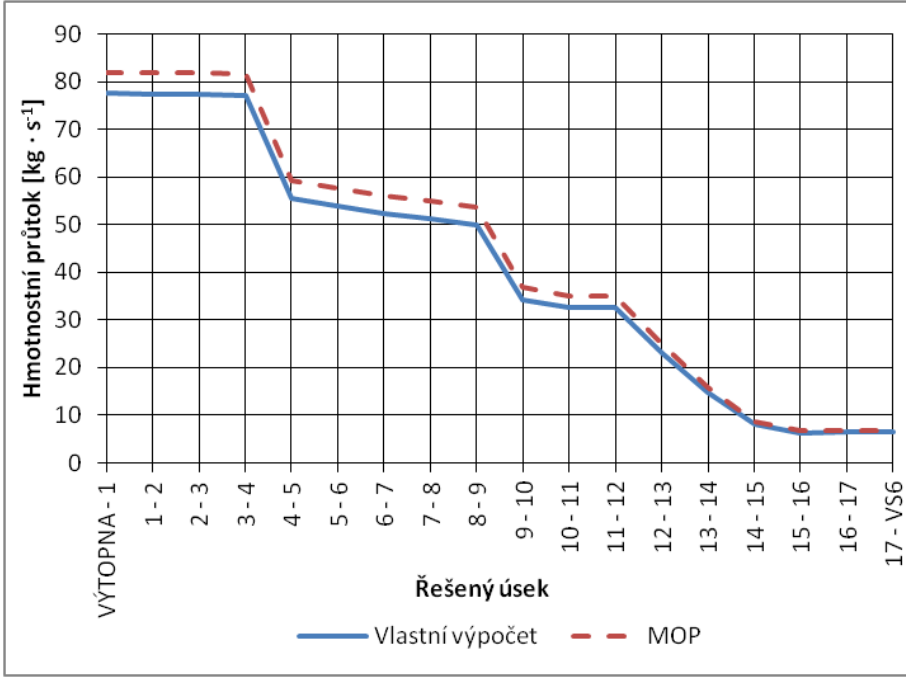
### **Změna hydrostatického tlaku:**

Tato hodnota může být kladná nebo záporná. Záleží, zda potrubí stoupá nebo klesá. Výpočet lze provést jako vynásobení překonávané výšky měrnou hmotností a gravitačním zrychlením.

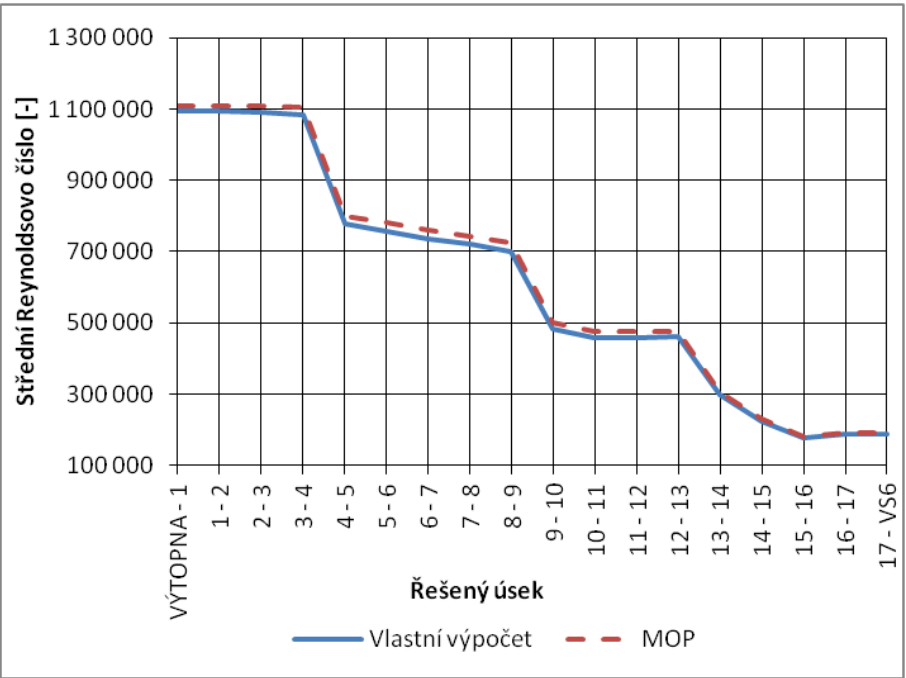
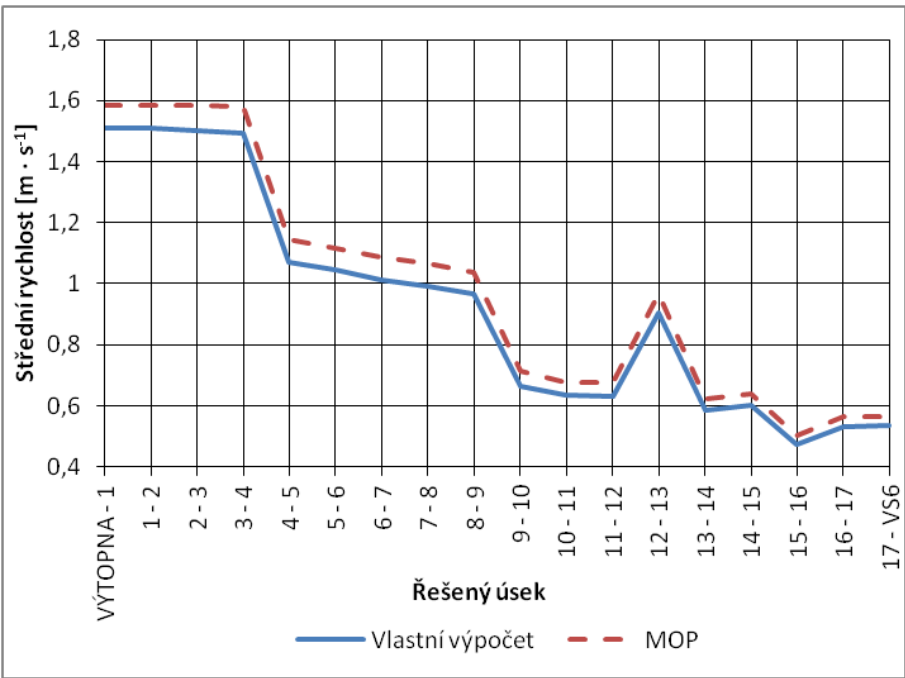
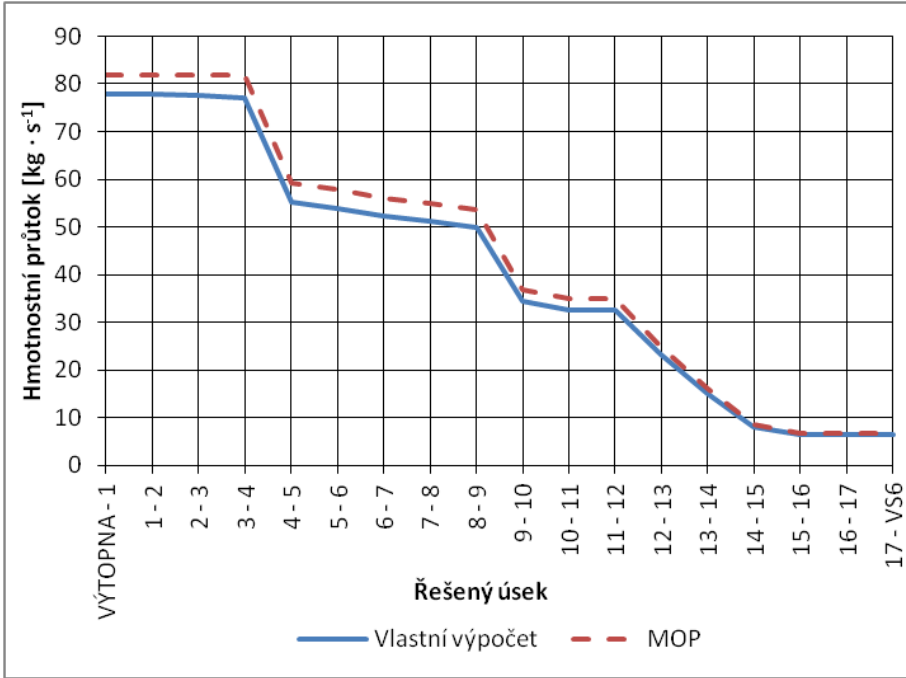
### **Nejvyšší přetlak:**

Výchozím bodem je VÝTOPNA, kde je na expanzním automatu udržována HKST (550 kPa). Na vratném potrubí při vstupu do výtopny je tedy přetlak 550 kPa. Následně se určí přetlak v každém uzlu ve vratném potrubí - vždy se přičtou tlakové ztráty za řešeným uzlem (tlaková ztráta třením, tlaková ztráta místními odpory a změna hydrostatického tlaku). Po stanovení přetlaku v nejvzdálenějším uzlu je nutné přičíst tlakovou ztrátu ve spotřebiči (tlaková ztráta deskového výměníku = cca 50 kPa). Toto je přetlak v nejvzdálenějším spotřebiči pro přívodní potrubí. Následně se stanoví přetlak v každém uzlu v přívodním potrubí - opět se přičtou tlakové ztráty za řešeným uzlem. Posledním řešeným uzlem je opět VÝTOPNA, kde musí být přetlak nejvyšší.

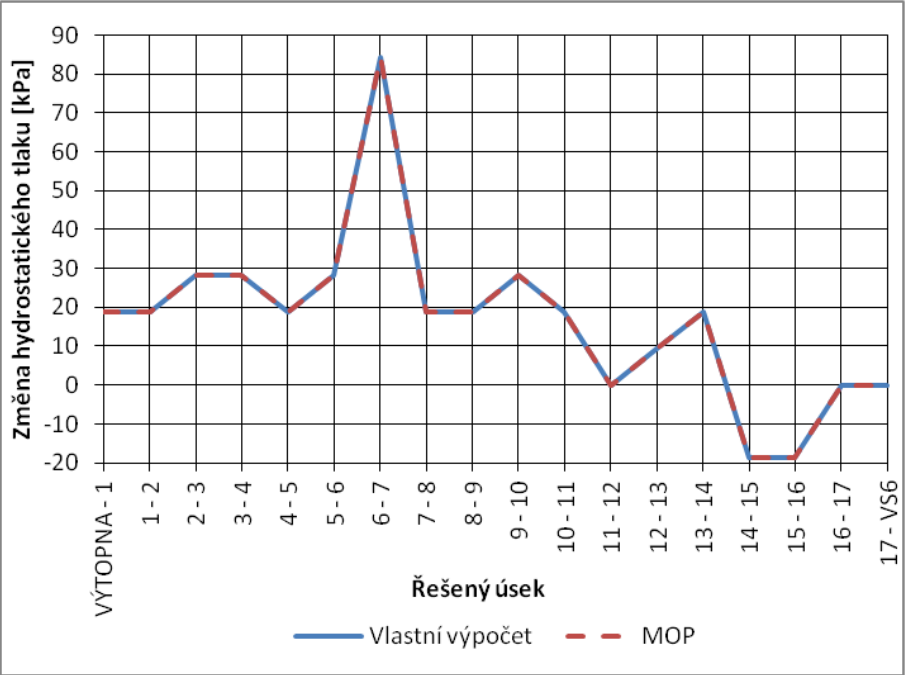
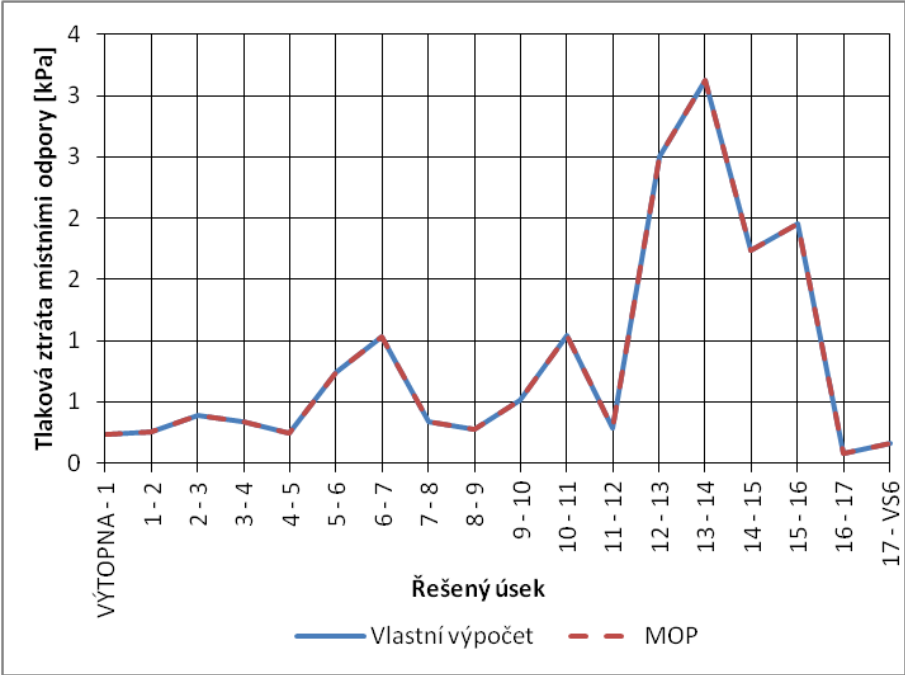
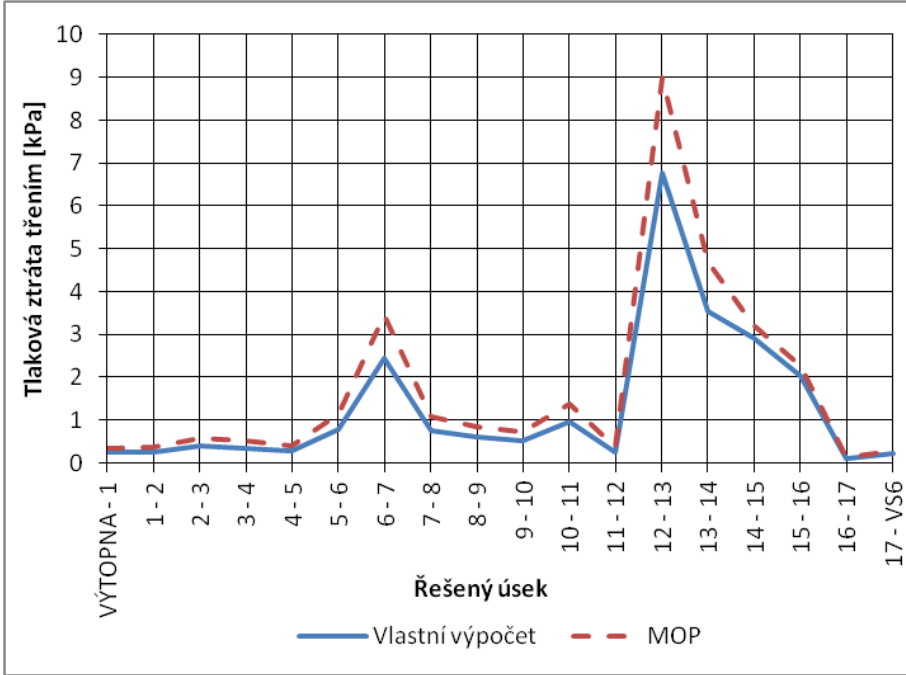
**Přívod:**



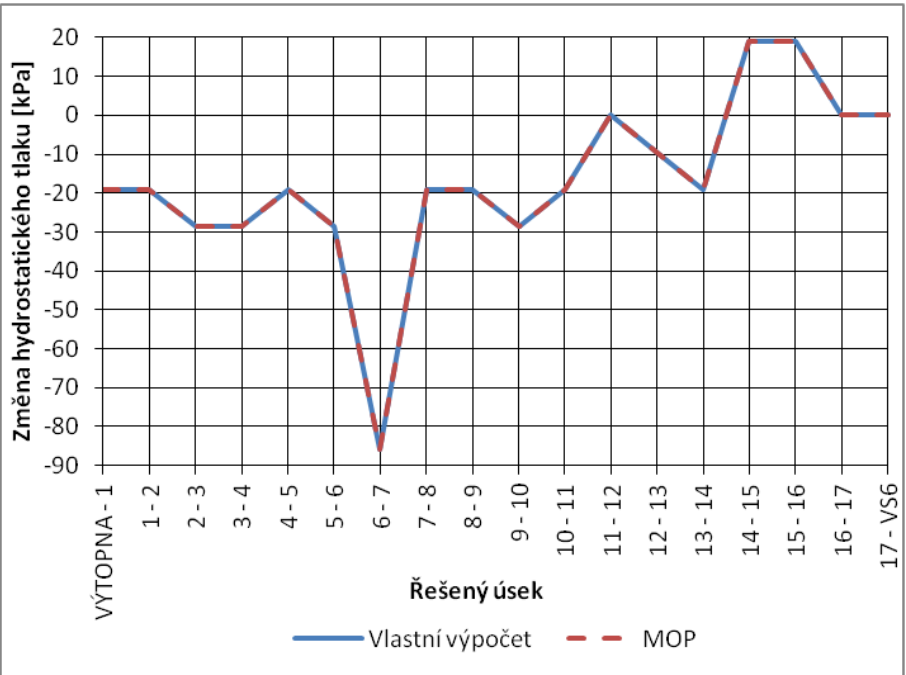
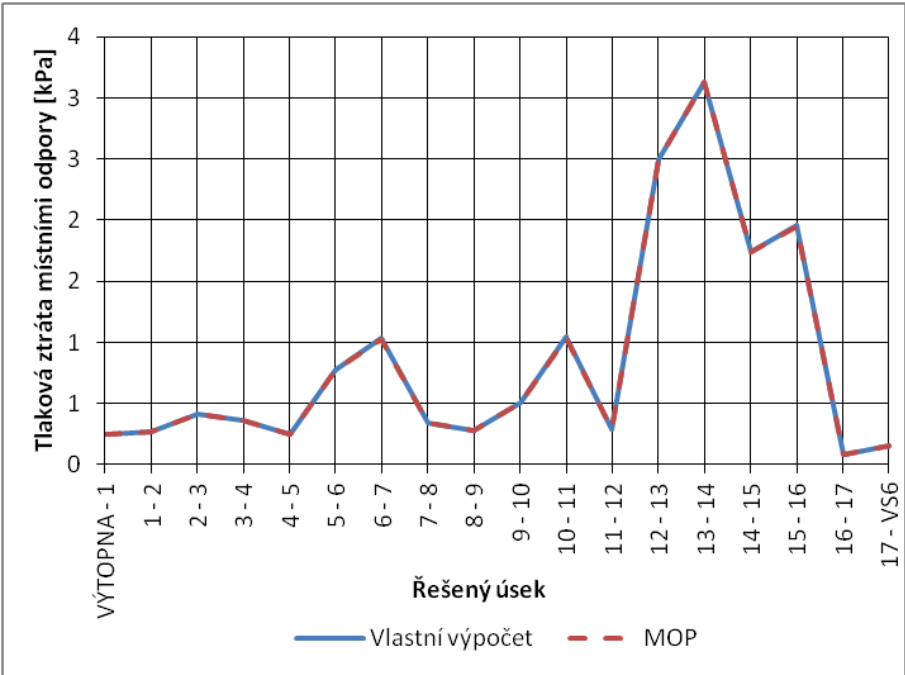
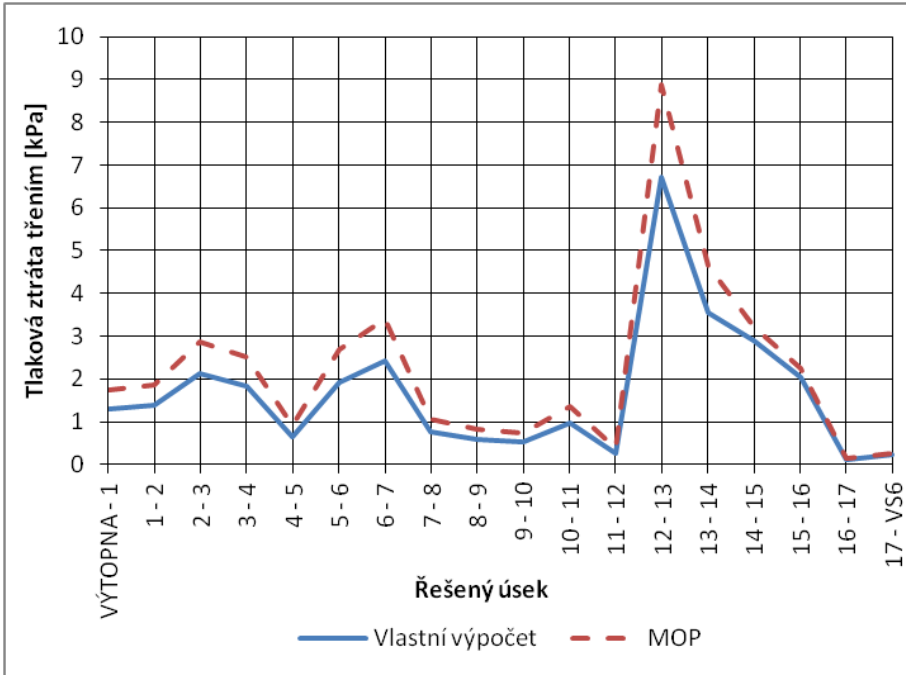
**Vrat:**



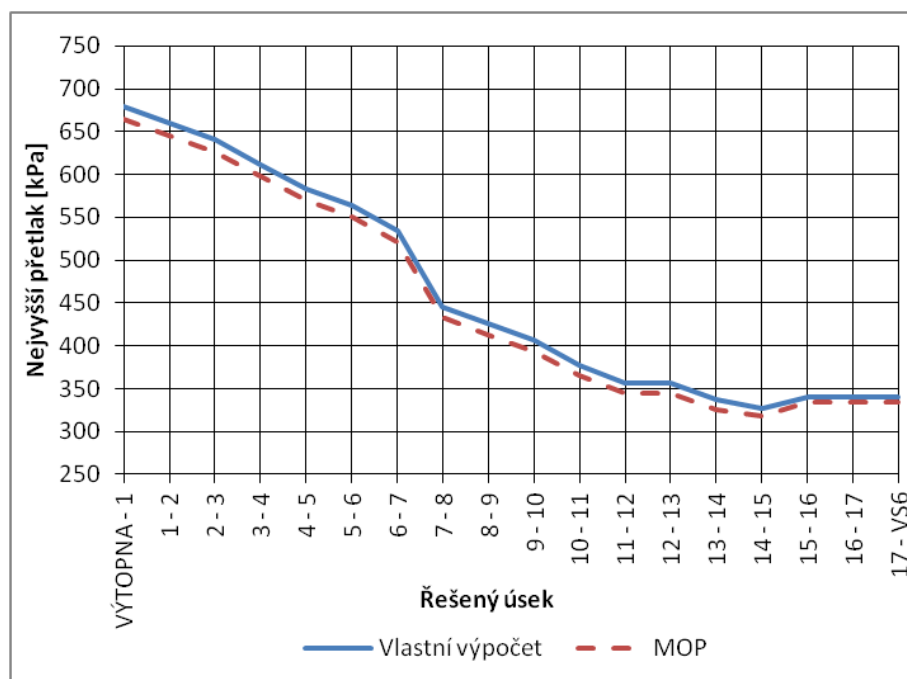
**Přívod:**



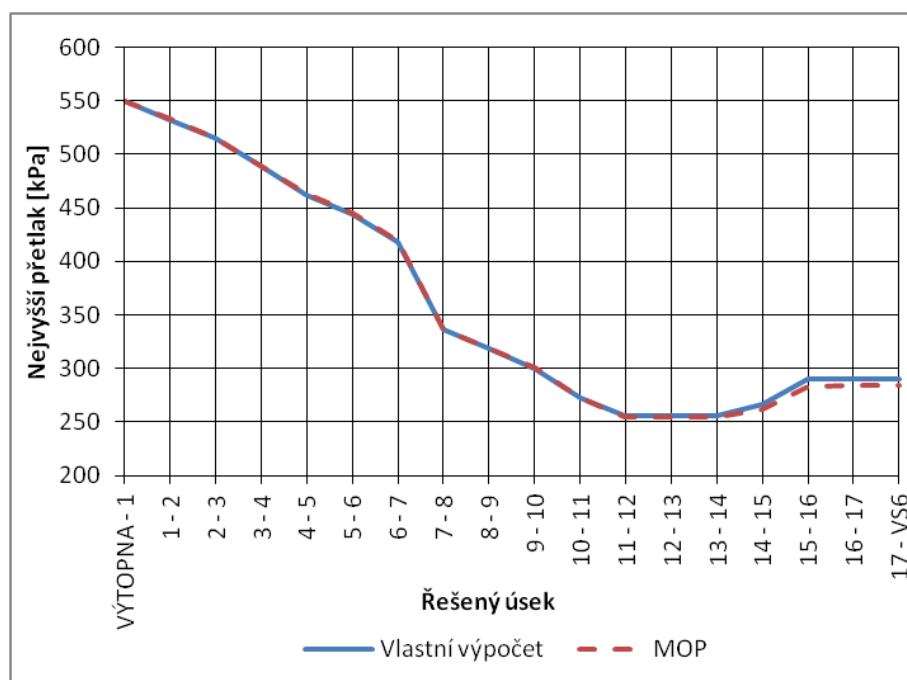
**Vrat:**



### Přívod:

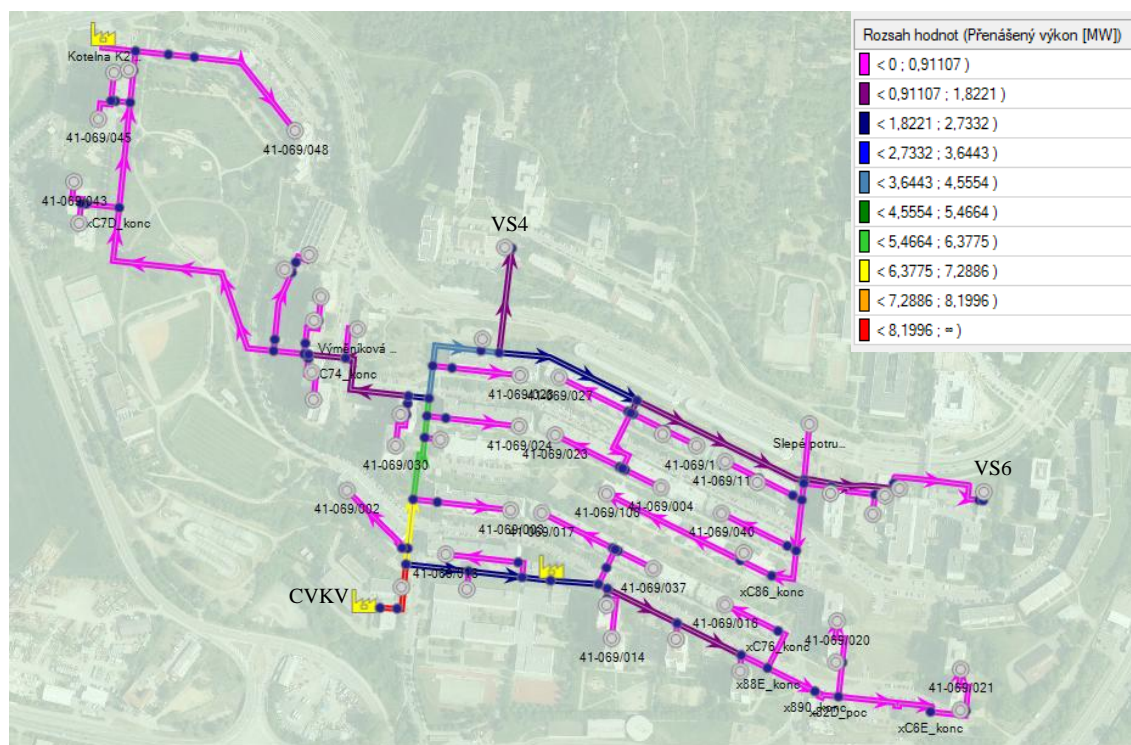


### Vrat:



## B.8 Grafické výstupy vybraných tepelně - hydraulických veličin

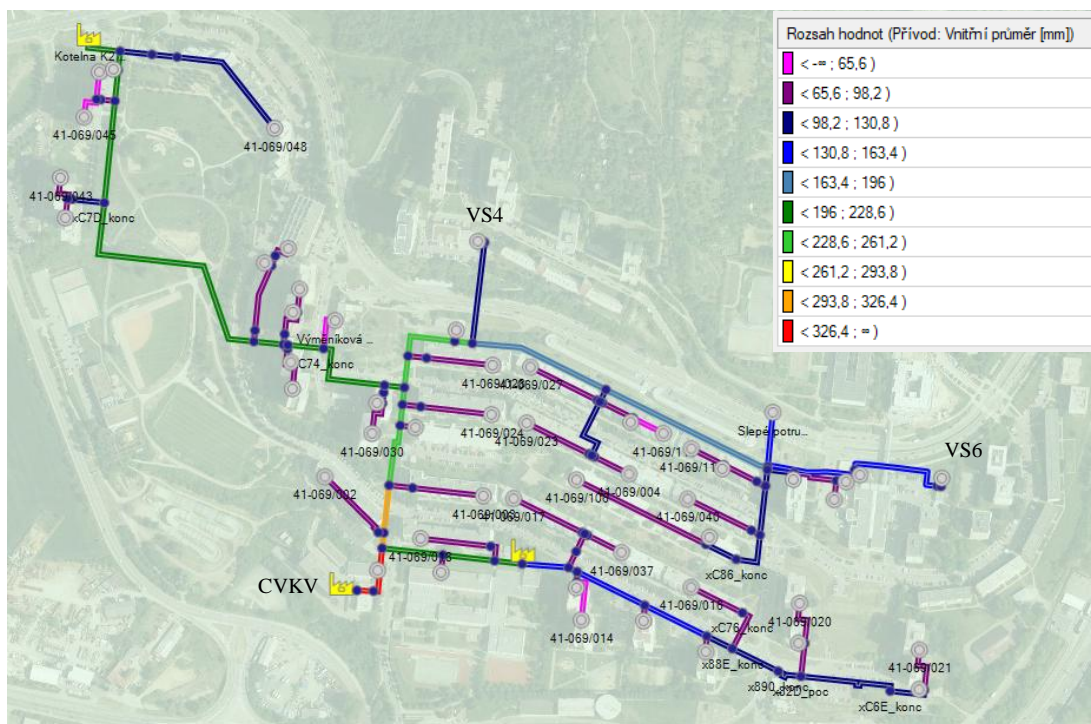
Vybrané grafické výstupy se budou týkat pouze přívodního potrubí pro zimní řez (-8 °C).



**Obr. 44** - Přenášený výkon [MW]

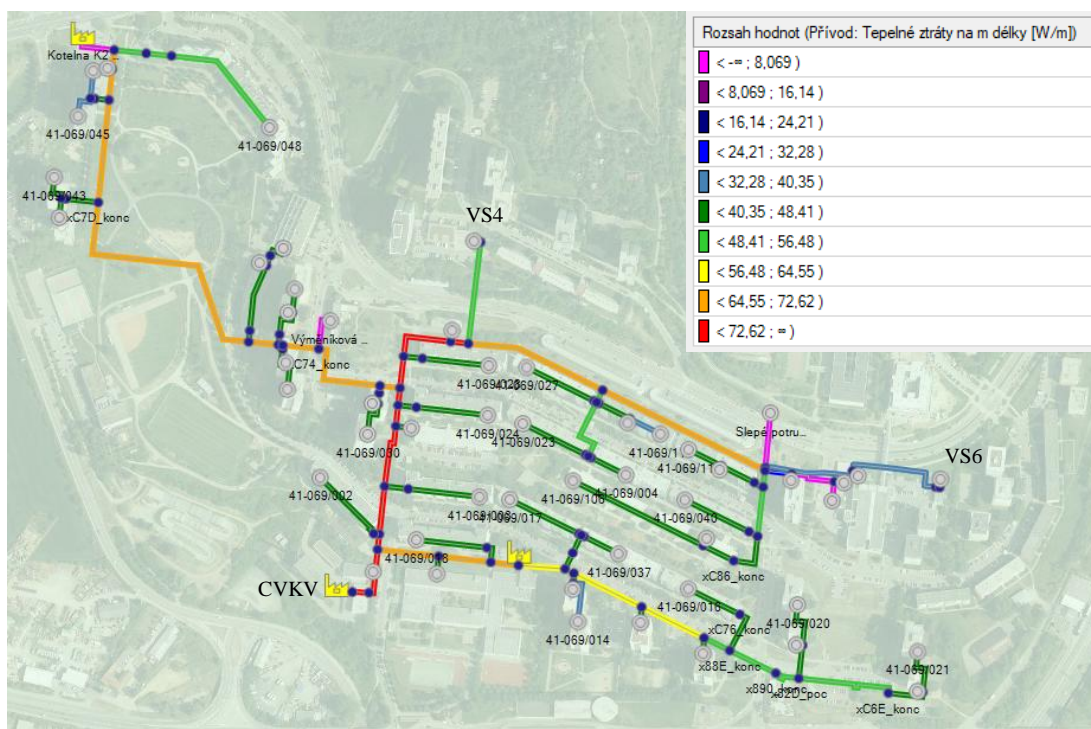
Nejvyšší přenášený výkon je v nejvyšší blízkosti zdroje tepla a s rostoucí vzdáleností od zdroje tepla klesá.





Obr. 45 - Přívod: Vnitřní průměr [mm]

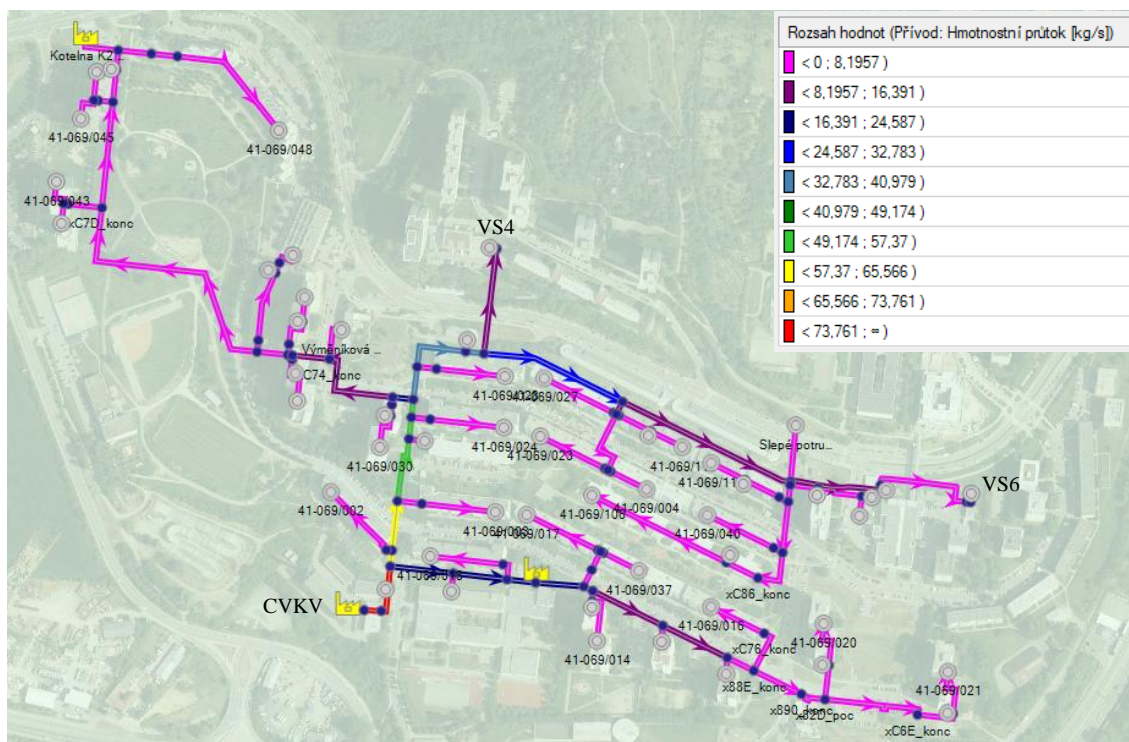
Dimenze potrubí na hydraulicky hlavní větvi od nejvzdálenějšího vodního spotřebiče po zdroj tepla postupně narůstá.



Obr. 46 - Přívod: Tepelné ztráty na 1 m délky potrubí [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

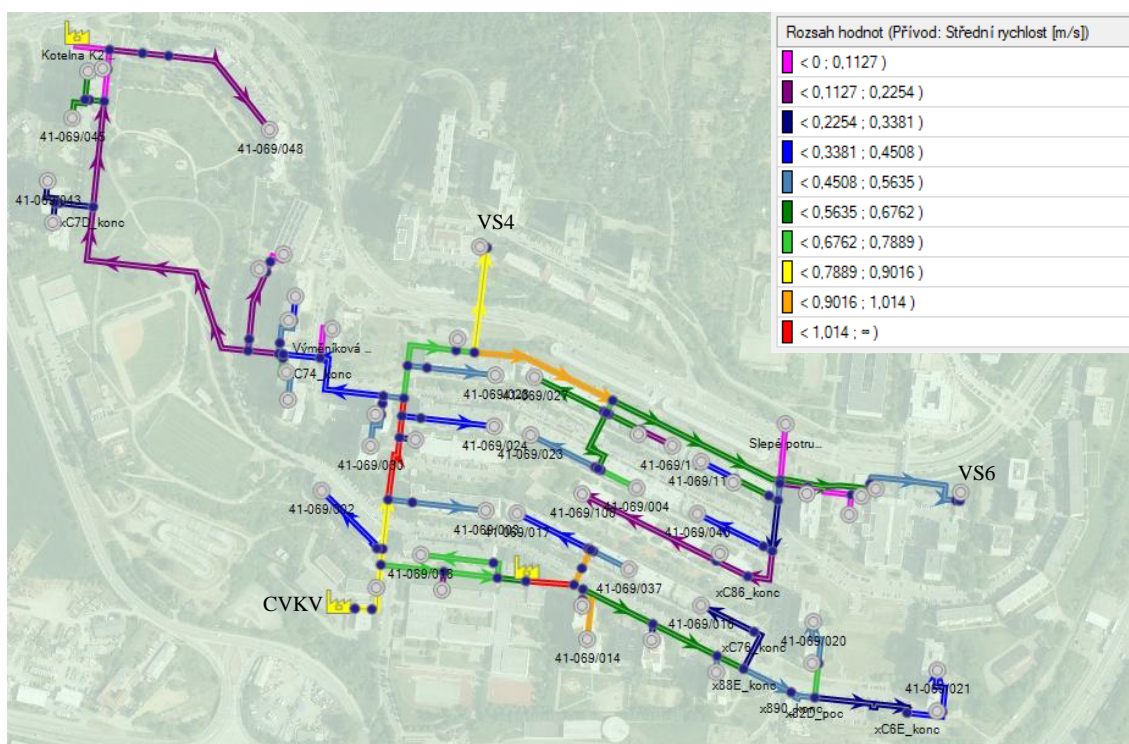
Nejvyšší tepelné ztráty jsou v hydraulicky hlavní větvi (především u potrubí vedeném v kolektoru a kanálu) a nejnižší tepelné ztráty jsou v předizolovaném potrubí.





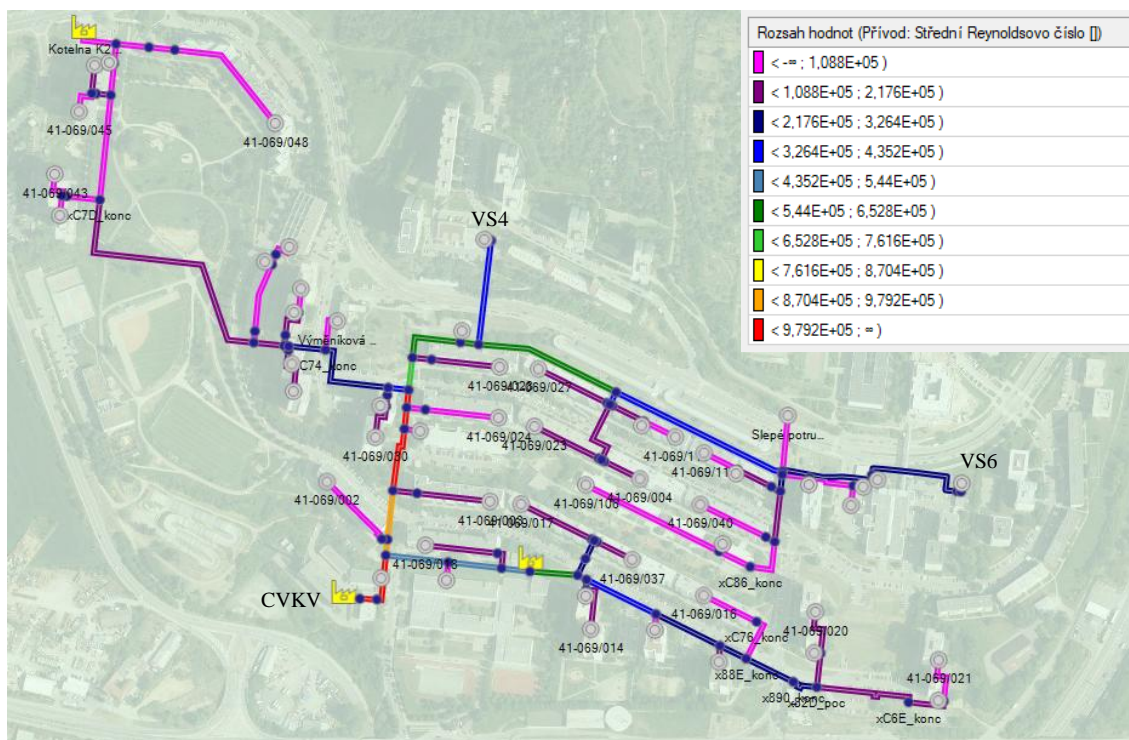
**Obr. 47** - Přívod: Hmotnostní průtok [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

Objemový průtok se postupně navyšuje od nejvzdálenějšího vodního spotřebiče a nejvyšší hodnoty jsou v hydraulicky hlavní větvi (největší průtok je u zdroje tepla).



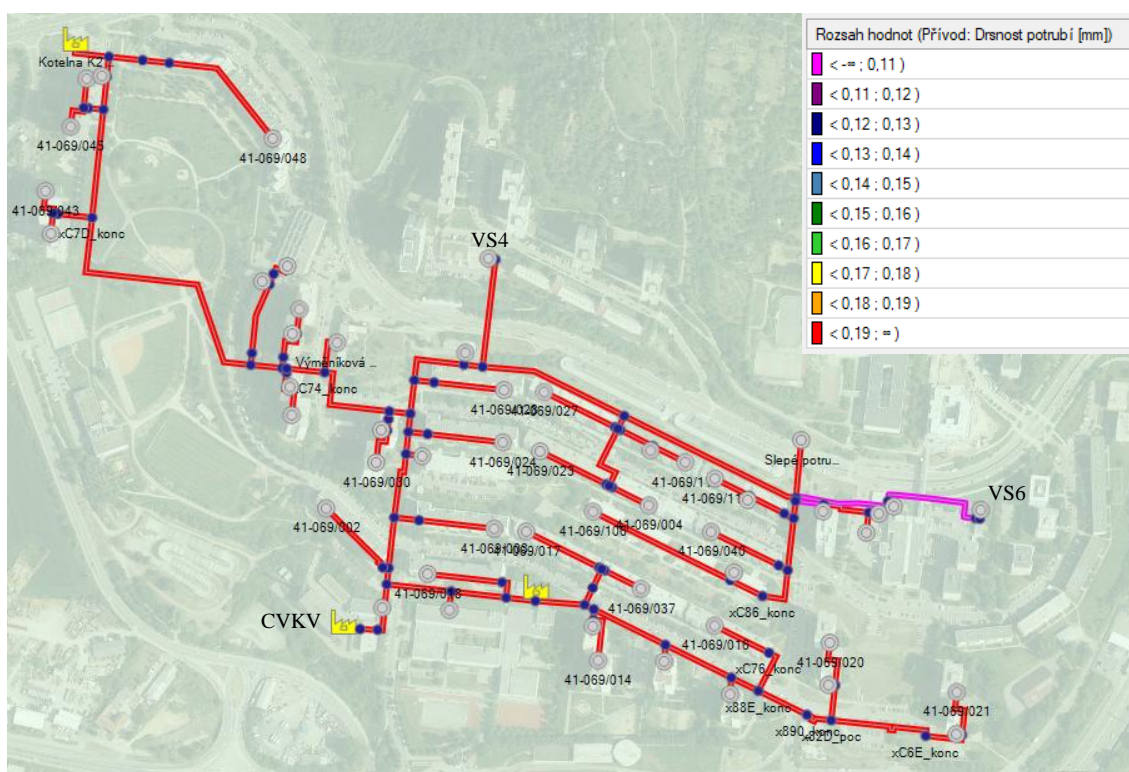
**Obr. 48** - Přívod: Střední rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

Nejvyšší rychlosti jsou v hlavních větvích. Ve větvích, které propojují větve hlavní s vodními spotřebiči, jsou rychlosti nižší.



Obr. 49 - Přívod: Střední Reynoldsovo číslo [-]

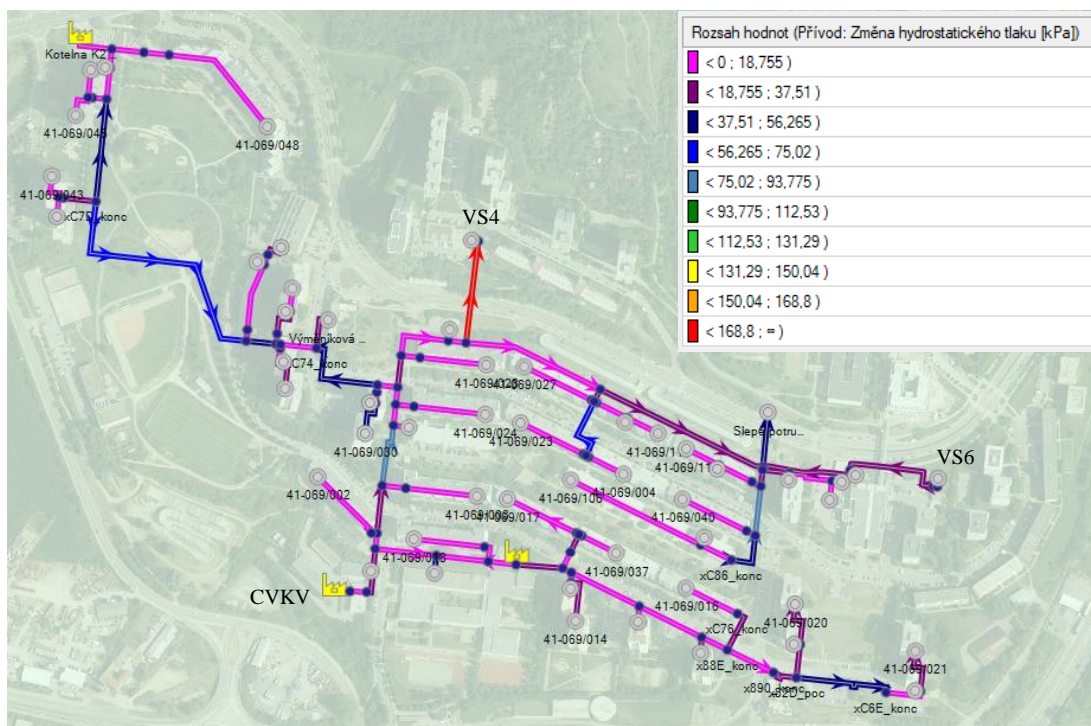
V celé tepelné síti se vyskytuje turbulentní proudění.



Obr. 50 - Přívod: Drsnost potrubí [mm]

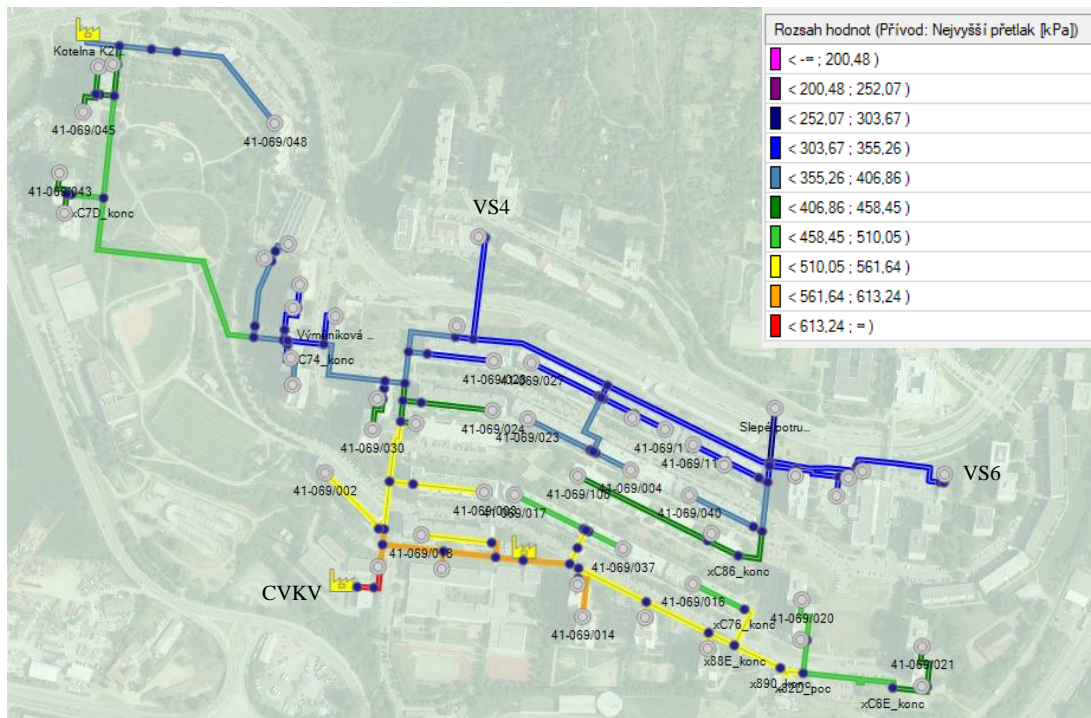
Drsnost potrubí u předizolovaného potrubí byla zvolena nižší (pozdější výstavba - nižší pravděpodobnost výskytu koroze a nánosů na vnitřních stěnách potrubí).





**Obr. 51** - Přívod: Změna hydrostatického tlaku [kPa]

Změna hydrostatického tlaku je závislá na výškové úrovni potrubí. Nejvyšší výškový rozdíl má trasa k výměníkové stanici VS4.



**Obr. 52** - Přívod: Nejvyšší přetlak [kPa]

Nejvyšší přetlak je u zdroje tepla naopak nejnižší je u hydraulicky nevzdálenějšího vodního spotřebiče (VS6).



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV  
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

## C. EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ A POČÍTAČOVÁ SIMULACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Tomáš Malach

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HIRŠ, CSc.

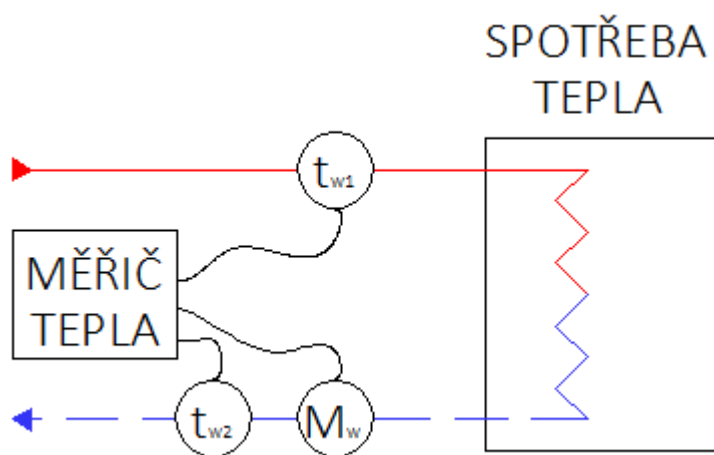
BRNO 2018

## C.1 Experimentální řešení

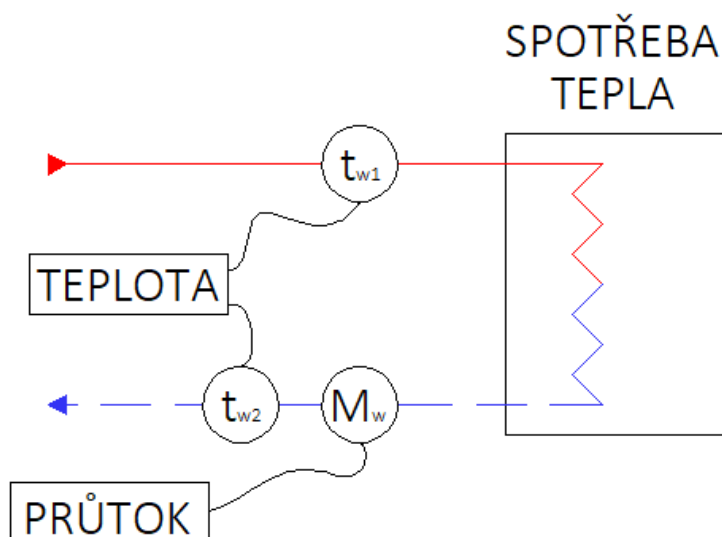
Cílem experimentálního řešení je stanovit množství dodaného tepla do odběrného místa (bytový dům) pomocí přístrojové techniky a výpočetních vztahů.

### C.1.1 Popis metody

Měřené hodnoty budou teploty teplotnosné látky v přívodním a vratném potrubí a objemový průtok teplotnosné látky ve vratném potrubí. Výpočet tepelného výkonu bude proveden pomocí kalorimetrické rovnice a následné stanovení dodaného tepla bude vypočteno integrací tepelného výkonu přes časový interval.



Obr. 53 - Schéma polohy čidel při měření dodávky tepla pomocí měřiče tepla



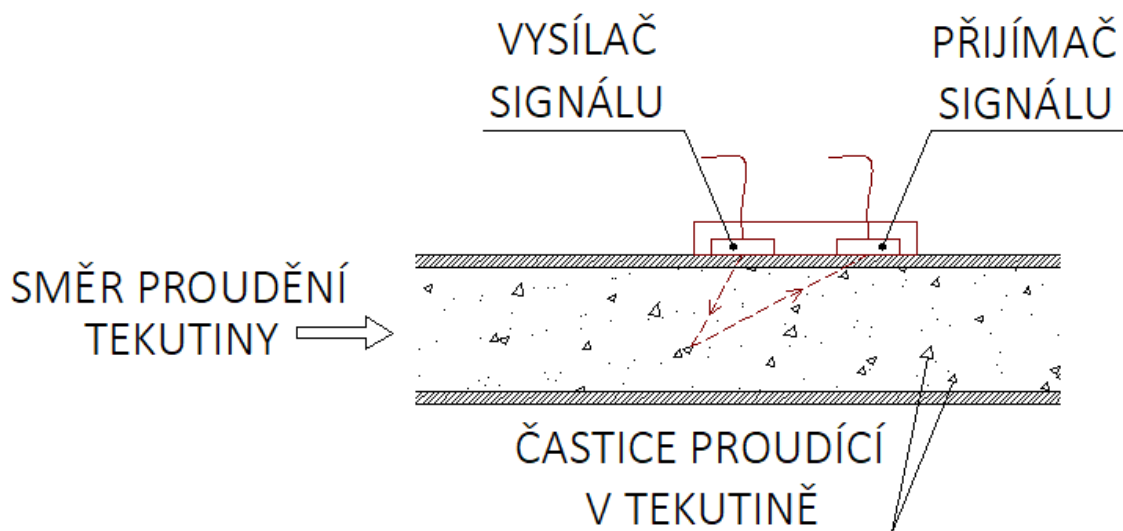
Obr. 54 - Schéma experimentálního měření dodávky tepla (poloha čidel měřící techniky)

### C.1.1.1 Stanovení objemového průtoku teplotonosné látky ultrazvukovým průtokoměrem

Důležitým vstupním parametrem pro stanovení dodaného tepla je průtok teplotonosné látky v potrubí. Měření ultrazvukovým průtokoměrem je z hlediska náročnosti měření jednoduchá varianta. Není vyžadován jakýkoli zásah do rozvodů potrubí.

#### Měření průtoku kapaliny Dopplerovým způsobem

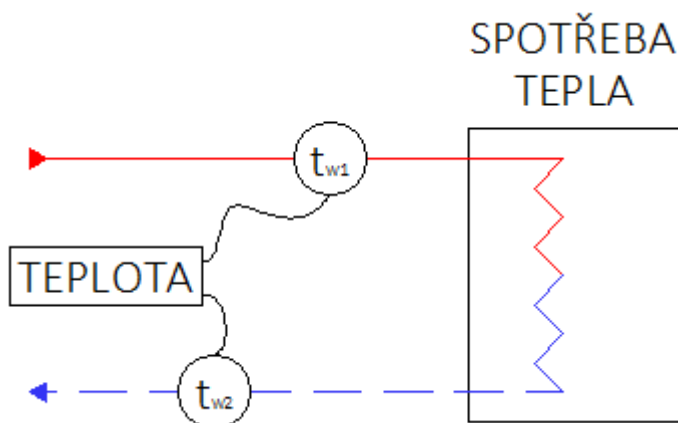
Měření ultrazvukovým průtokoměrem na tomto principu je založeno na vysílání ultrazvukových vln do proudící tekutiny v potrubí a přijímání vlnění, které je odraženo od pevných částic nebo vzduchových bublin proudících v tekutině. Důsledkem pohybu pevných částic a vzduchových bublin proudících v tekutině je frekvence vyslaných a přijatých ultrazvukových vln rozdílná. Rozdíl těchto vyslaných a přijatých ultrazvukových vln je úměrný rychlosti proudění tekutiny v potrubí. [17]



Obr. 55 - Vysílání a přijímání ultrazvukového signálu [17]

### C.1.1.2 Stanovení teploty teploty teploty

Pro určení množství dodaného tepla je nutné znát teplotu, o kterou se ochladí přiváděná teplota. Proudící kapalina od zdroje tepla v přívodním potrubí předá teplo spotřebiteli a následně se vrací zpět do zdroje tepla pomocí vratného potrubí. Je tedy nutné měřit teplotu teploty teploty v přívodním potrubí (před předáním tepla) i ve vratném potrubí (po předání tepla). Výsledný rozdíl těchto teplot udává, jak moc se teplota po předání tepla ochladila.



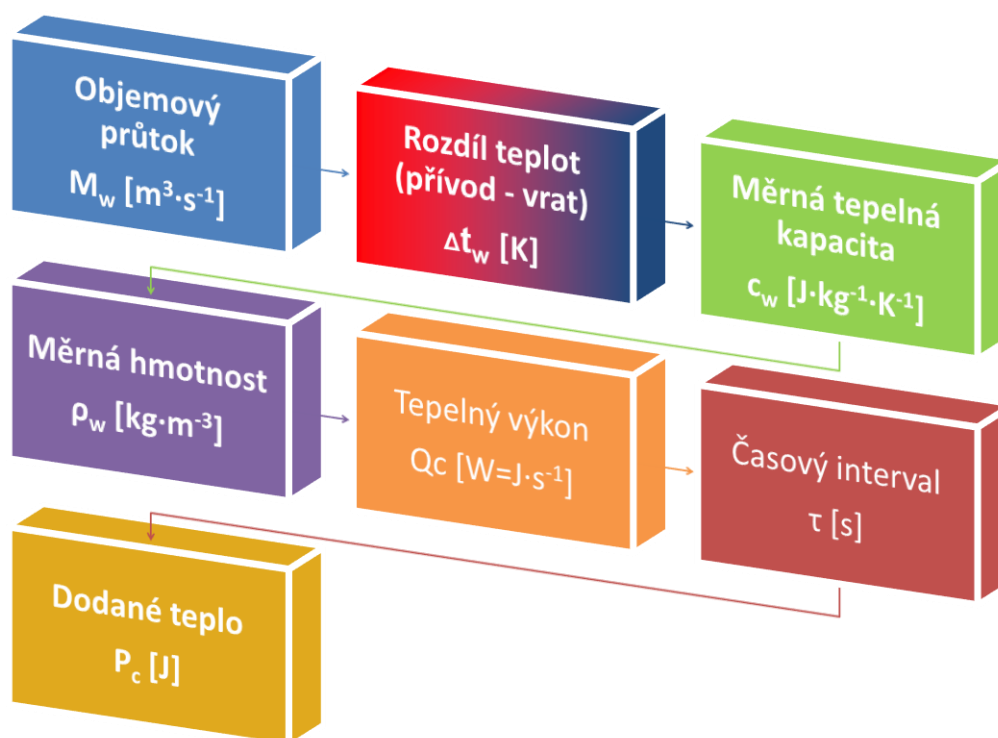
Obr. 56 - Měření teplot teploty teploty před a po předání tepla spotřebiteli

$$\Delta t_w = (t_{w1} - t_{w2}) \quad [K] \quad (1.29)$$

$\Delta t_w$	ochlazení teploty teploty po předání tepla [K]
$t_{w1}$	teplota teploty teploty - vody v přívodním potrubí [°C]
$t_{w2}$	teplota teploty teploty - vody ve vratném potrubí [°C]

### C.1.1.3 Stanovení výpočtu dodaného tepla

Vstupní hodnoty pro výpočet dodaného tepla jsou naměřené objemové průtoky ultrazvukovým průtokoměrem a teploty teploty teploty v přívodním a vratném potrubí. Dle naměřených teplot se následně stanoví pro příslušné teploty měrná tepelná kapacita a měrná hmotnost teploty teploty. Poté je možné spočítat tepelný výkon a při známém časovém intervalu lze určit dodané teplo.



**Obr. 57** - Postup pro stanovení dodaného tepla

Výpočet tepelného výkonu je možné provést pomocí kalorimetrické rovnice. Její předpis pro výpočet je dle vztahu (1.30).

$$Q_c = M_w \cdot [(c_{w1} \cdot t_{w1} \cdot \rho_{w1}) - (c_{w2} \cdot t_{w2} \cdot \rho_{w2})] \quad [W] \quad (1.30)$$

$Q_c$	tepelný výkon[W]
$M_w$	objemový průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$c_{w1}$	měrná tepelná kapacita teplotnosné látky - vody, pro teplotu $t_{w1}$ - teplota v přívodním potrubí [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$c_{w2}$	měrná tepelná kapacita teplotnosné látky - vody, pro teplotu $t_{w2}$ - teplota ve vratném potrubí [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$t_{w1}$	teplota teplotnosné látky - vody v přívodním potrubí [ $^{\circ}C$ ]
$t_{w2}$	teplota teplotnosné látky - vody ve vratném potrubí [ $^{\circ}C$ ]
$\rho_{w1}$	měrná hmotnost teplotnosné látky - vody v přívodním potrubí [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho_{w2}$	měrná hmotnost teplotnosné látky - vody ve vratném potrubí [ $kg \cdot m^{-3}$ ]



Dodané teplo se stanoví integrací vypočteného tepelného výkonu  $Q_c$  za časový interval  $\tau$  (1.31).

$$P_c = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_c d\tau \quad [J] \quad (1.31)$$

$P_c$	dodané teplo [J]
$Q_c$	tepelný výkon[W]
$\tau_1$	počátek časového intervalu [s]
$\tau_2$	konec časového intervalu [s]

### C.1.2 Popis přístrojové techniky

#### Ultrazvukový průtokoměr PT 878

Soustava ultrazvukového průtokoměru PT878 je tvořena ze dvou částí.

- **Záznamové zařízení**

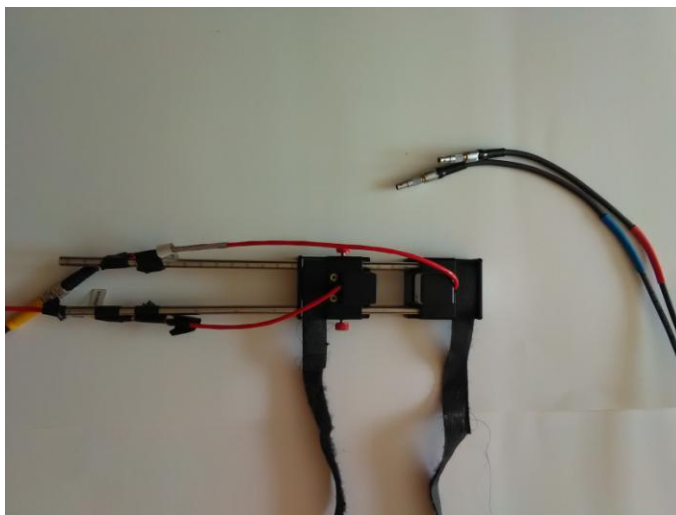
Tato část je tvořena elektrickými obvody, které vytvářejí, přijímají a vyhodnocují časy průběhu ultrazvukových signálů.



**Obr. 58** - Záznamové zařízení ultrazvukového průtokoměru PT878

- **Příložný snímač UTXDR # 407**

Při vysílání mění elektrickou energii na ultrazvukové impulzy a při příjmu mění ultrazvukové impulzy zpět na elektrickou energii.



**Obr. 59** - Příložný snímač ultrazvukového průtokoměru PT878



**Obr. 60** - Kompletní sestava ultrazvukového průtokoměru PT878

### Specifikace záznamového zařízení:

přesnost měření průtoku

průměr potrubí < 150 mm:

- 0,5% až 1% naměřené hodnoty (s kalibrací)
- typicky 2 % až 5 %

### Specifikace příložného snímače UTXDR # 407:

teplotní rozsah

- od - 20 °C do 60 °C

materiály potrubí

- všechny kovy a většina plastů

průměr potrubí

- od 50 mm do 200 mm

provozní frekvence:

- 2 MHz

Aby byl do materiálu potrubí veden ze snímače ultrazvukový signál, je nutné použít kontaktní materiál. Ten se nanese na snímač před osazením na potrubí. Jako kontaktní materiál je používán speciální gel. Při měření bude použit gel na níže uvedeném obrázku (rozsah měření teplot je -17,77 °C až 93,33 °C).



**Obr. 61** - Kontaktní materiál - gel

### **Datalogger COMET S0141**

Jedná se o čtyřkanálový záznamník teploty s displejem. Specifikace záznamníku jsou následující:

provozní teplota	- od - 30 °C do + 70 °C
provozní vlhkost	- od 0 % do 100 %
rozsah měření teploty	- od - 90 °C do + 260°C (sondy s odporovým snímačem Pt 1000) - od - 50 °C do + 150°C (sondy s odporovým snímačem Ni 1000)
přesnost výstupů teploty (bez sond)	$\pm 0,2$ °C v rozsahu - 50 °C až + 100 °C $\pm 0,2$ % v rozsahu + 100 °C až + 260 °C $\pm 0,4$ % v rozsahu - 50 °C až - 90 °C



**Obr. 62 - COMET S0141**

### **Příložné teplotní sondy Pt 1000**

rozsah měření teploty

- od - 30 °C do + 80 °C



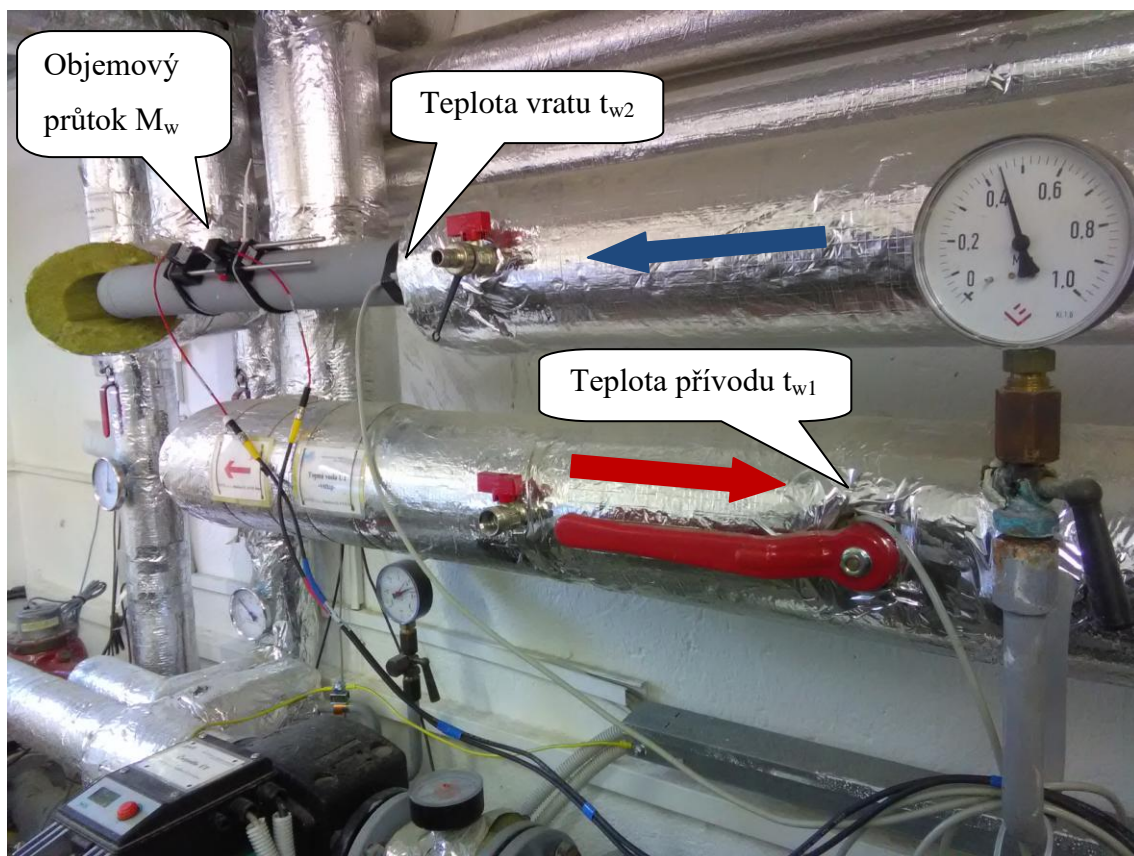
**Obr. 63** - Příložná teplotní sonda Pt 1000

### **C.1.3 Měření a výpočet**

Měření dodaného tepla probíhalo v tlakově závislé předávací stanici bytového domu na ulici Oblá 2 v Brně - Nový Lískovec. Cílem měření bylo stanovit pouze dodané teplo pro vytápění.



**Obr. 64** - Řešený objekt zásobovaný teplem



**Obr. 65** - Poloha měřidel v tlakově závislé předávací stanici v řešeném bytovém domě

Barevné šipky znázorňují směr toku teplotnosné látky - vody. Červená šipka označuje přívodní potrubí a modrá šipka označuje potrubí vratné.

V následujících grafech budou prezentována naměřená data a data stanovená pomocí vztahů.

### **Měřená data**

Objemový průtok ( $M_w$ ), teplota teplotnosné látky - vody v přívodním potrubí ( $t_{w1}$ ) a ve vratném potrubí ( $t_{w2}$ ) jsou data měřená.

počátek měření: 25.10. 2017 12:45  
 konec měření: 2.11. 2017 10:00  
 časový krok: 15 minut = 900 sekund

### **Vypočtená data:**

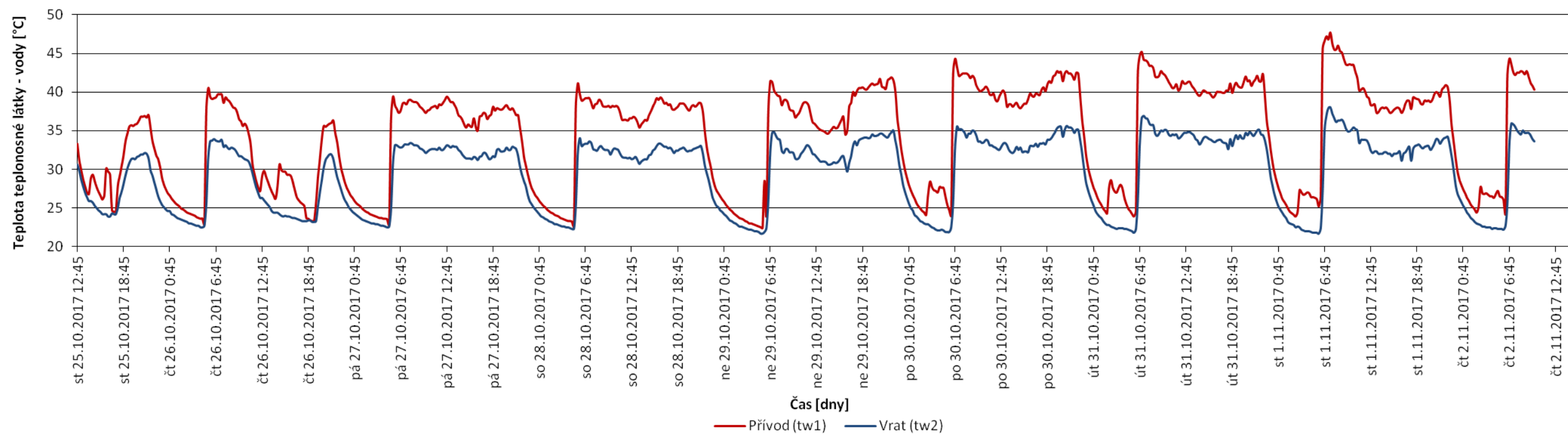
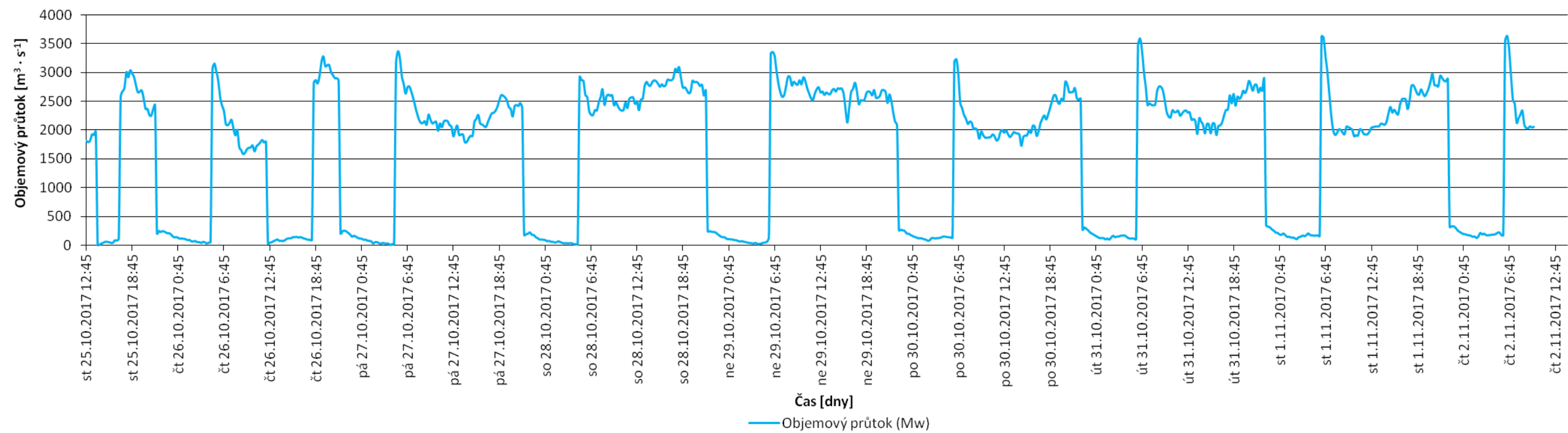
měrná hmotnost teplotnosné látky - vody ( $\rho_{w1}$ ,  $\rho_{w2}$ ) - dle vztahu **1.1 (kap. A.4.1)**

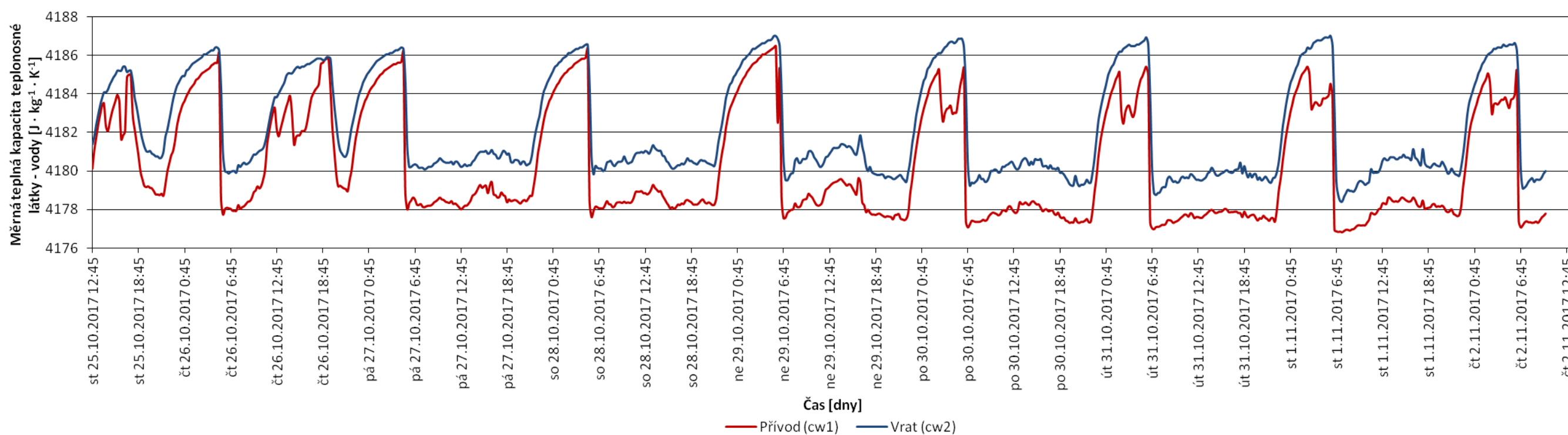
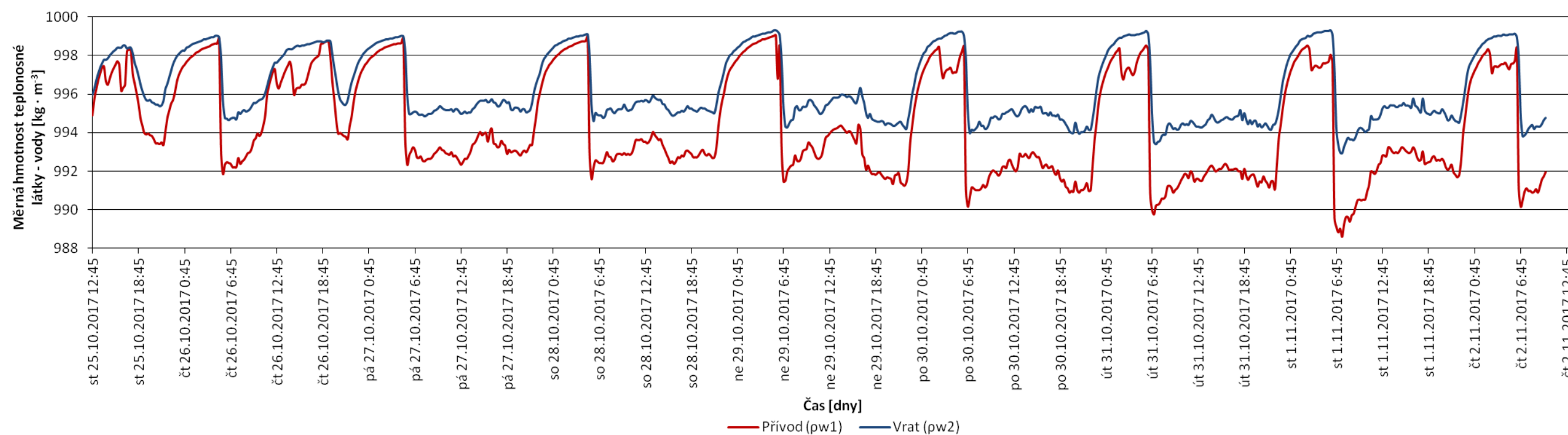
měrná tepelná kapacita teplotnosné látky - vody ( $c_{w1}$ ,  $c_{w2}$ ) - dle vztahu **1.2 (kap. A.4.1)**

tepelný výkon ( $Q_c$ ) - dle vztahu **1.30 (kap. C.1.1.3)**

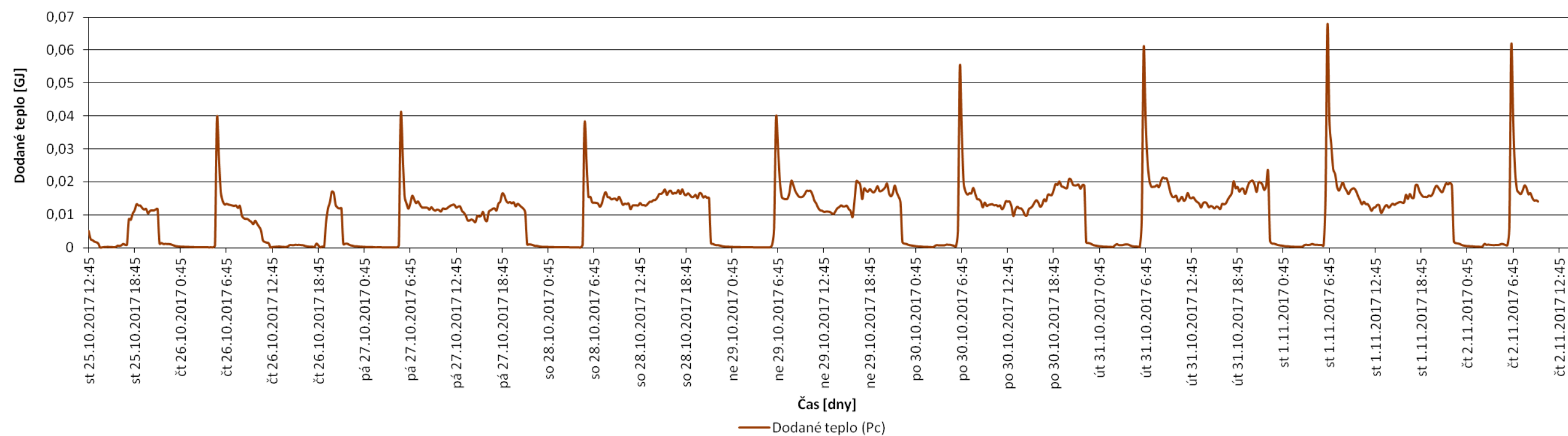
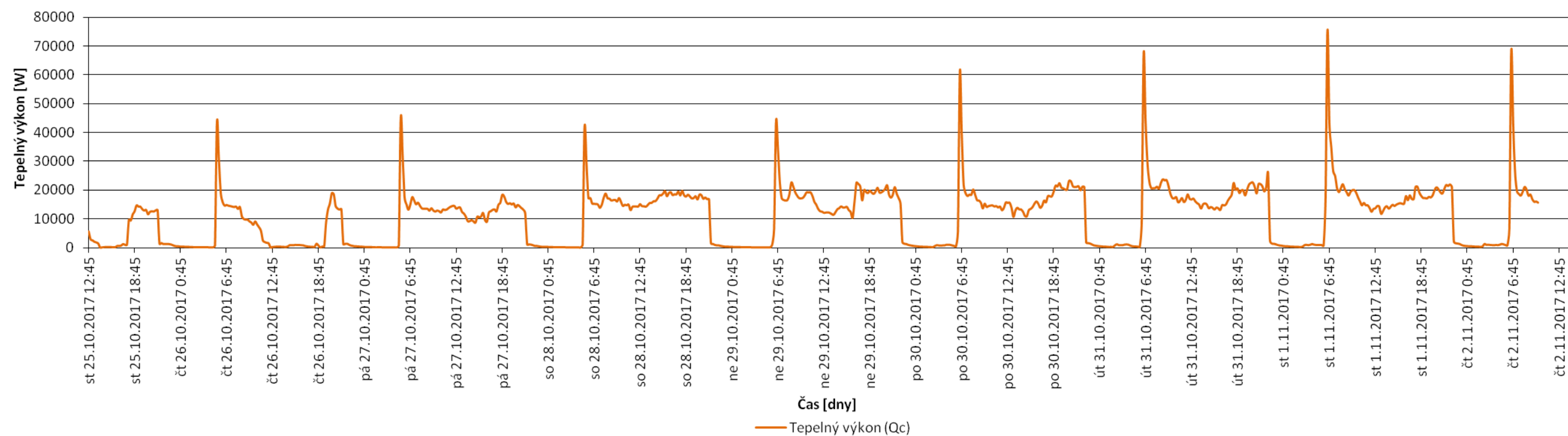
dodané teplo ( $P_c$ ) - dle vztahu **1.31 (kap. C.1.1.3)**











### C.1.4 Ověření správnosti výsledku

Součet vypočteného dodaného tepla za jednotlivé časové intervaly určí výsledné množství dodaného tepla za celé měřené období. Tento součet činí výpočtem 7,345 GJ.

Jako porovnání výsledků bude sloužit rozdíl dodaného tepla na konci a počátku měření. Tento odečet byl proveden na měřiči tepla, který je součástí domovní předávací stanice v řešeném objektu. Tato předávací stanice obsahuje měřiče tepla dva - pro teplou vodu a vytápění. Jelikož jsem stanovoval množství dodaného tepla pro vytápění, provedl jsem odečet na měřiči tepla pro vytápění.



Obr. 66 - Odečet z měřiče tepla

- |                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| • 25.10. 2017 12:45           | 1394,343 GJ |
| • 2.11. 2017 10:00            | 1402,084 GJ |
| • dodané teplo za dané období | 7,741 GJ    |

### **Závěrečné zhodnocení:**

Výpočet: **7,345 GJ**

Odečet z měřiče tepla: **7,741 GJ**

Rozdíl dodaného tepla mezi výpočtem a měřičem tepla činí 0,396 GJ (tj. 5,39 %). Vznik tohoto rozdílu mohl být zapříčiněn přesností měřicí techniky (přesnost měření průtoku je typicky 2 % až 5 %, přesnost měření teploty je  $\pm 0,2$  °C) a umístěním měřicí techniky (např. teplota teplotnosné látky byla měřena na povrchu potrubí a ne v jímce pro teplotní sondy).



**Obr. 67** - Umístění teplotní sondy v jímce

Výsledné stanovení množství dodaného tepla pomocí experimentálního měření a výpočtu je možné považovat za uspokojivé. Jako přesnější hodnotu lze uvažovat odečet z měřiče tepla, jelikož se jedná o kalibrované měřidlo, které slouží k fakturaci za dodané teplo.

## C.2 Počítačová simulace

Cílem je provést dynamickou simulaci výroby tepla ve zdroji za účelem predikce výroby tepla pro budoucí roky. Simulace bude provedena pro typicky zimní měsíc - leden. Pro simulaci bude využit software MOP od firmy Ortep.

Výpočet bude proveden pomocí neuronového modelu spotřeby. Predikcí tepla pro centrální zásobování teplem s využitím neuronových sítí se zabývá disertační práce Ing. Petra Komínka z fakulty stavební VUT v Brně. [22]

Cílem neuronového modelu je myslet a rozhodovat jako člověk na základě historických událostí. Ve funkci predikce výroby tepla má své uplatnění například pro přiřazení k určité venkovní teplotě požadovaný výkon zdroje tepla, aby bylo zajištěno dodání požadovaného množství tepla ke spotřebiteli.

### C.2.1 Rozdíl mezi stacionárním a dynamickým výpočtem

Výchozím podkladem je model tepelné sítě, který sloužil ke stacionárnímu výpočtu (tento model byl použit v **kapitole B** této diplomové práce). Oproti stacionárnímu výpočtu (výpočet byl proveden pro pevně danou dobu - zimní období, letní období, ...) se dynamický výpočet zabývá určitým časovým intervalem s daným časovým krokem výpočtu.

### C.2.2 Okrajové podmínky pro zimní období

Zůstávají stejné jako pro stacionární výpočet v zimním období. Změna okrajových podmínek se týká zadáním časového intervalu a časového kroku výpočtu. Pro tento časový interval se zvoleným časovým krokem se zadá teplota venkovního vzduchu a požadovaná teplota teplonosné látky na výstupu ze zdroje tepla. Klimatická data je možné získat z meteorologických stanic. Teplotu teplonosné látky na výstupu ze zdroje tepla je možné stanovit z rovnice ekvitemní křivky, pokud je zdroj tepla ekvitemně řízen.

### C.2.3 Kritérium posouzení přesnosti predikce

Pro zhodnocení přesnosti predikovaných parametrů z dynamické simulace bude použit vztah pro RMSE (Root Mean Square Error - odmocninová střední čtvercová chyba). Čím je hodnota RMSE nižší, tím je stanovení predikované hodnoty přesnější. Výpočetní vztah je uveden v **1.32**. [23]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (1.32)$$

$n$  počet hodnot vstupujících do výpočtu  
 $x_i$  skutečná hodnota  
 $\bar{x}_i$  predikovaná hodnota

#### C.2.4 Stanovení rovnice ekvitermní křivky zdroje tepla (CVKV)

Rovnice ekvitermní křivky byla stanovena na základě hodnot, které ji skutečně určují.

x	[°C]	-8	-5	0	5	8	15
y	[°C]	105	95	85	85	80	75

**Tab. 11** - Skutečné hodnoty určující ekvitermní křivku

Pro tyto dané hodnoty (závislost teploty vody na výstupu z CVKV na teplotě venkovního vzduchu) byla stanovena rovnice funkce  $f_x$ . Tento výpočetní vztah byl stanoven pomocí diskrétní metody nejmenších čtverců - aproximace kvadratickým polynomem (1.33).

$$f_x: y = c_1 + c_2 \cdot x + c_3 \cdot x^2 \quad (1.33)$$

#### Výpočet:

Neznámé koeficienty  $c_1$ ,  $c_2$  a  $c_3$  lze řešit jako soustavu lineárních rovnic (1.34).

$$\begin{pmatrix} \varphi_1; \varphi_1 & \varphi_1; \varphi_2 & \varphi_1; \varphi_3 \\ \varphi_2; \varphi_1 & \varphi_2; \varphi_2 & \varphi_2; \varphi_2 \\ \varphi_3; \varphi_1 & \varphi_3; \varphi_2 & \varphi_3; \varphi_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi; \varphi_1 \\ \varphi; \varphi_2 \\ \varphi; \varphi_3 \end{pmatrix} \quad (1.34)$$

$\varphi_i$  vektory  
 $c_i$  hledané koeficienty

$$\varphi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; \varphi_2 = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8 \\ -5 \\ 0 \\ 5 \\ 8 \\ 15 \end{pmatrix}; \varphi_3 = \begin{pmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \\ x_3^2 \\ x_4^2 \\ x_5^2 \\ x_6^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 64 \\ 25 \\ 0 \\ 25 \\ 64 \\ 225 \end{pmatrix}; \varphi = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 105 \\ 95 \\ 85 \\ 85 \\ 80 \\ 75 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llll} \varphi_1; \varphi_1 = 6 & \varphi_1; \varphi_2 = 15 & \varphi_1; \varphi_3 = 403 & \varphi; \varphi_1 = 525 \\ \varphi_2; \varphi_1 = 15 & \varphi_2; \varphi_2 = 403 & \varphi_2; \varphi_3 = 3375 & \varphi; \varphi_2 = 875 \\ \varphi_3; \varphi_1 = 403 & \varphi_3; \varphi_2 = 3375 & \varphi_3; \varphi_3 = 60067 & \varphi; \varphi_3 = 33215 \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} 6 & 15 & 403 \\ 15 & 403 & 3375 \\ 403 & 3375 & 60067 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 525 \\ 875 \\ 33215 \end{pmatrix}$$

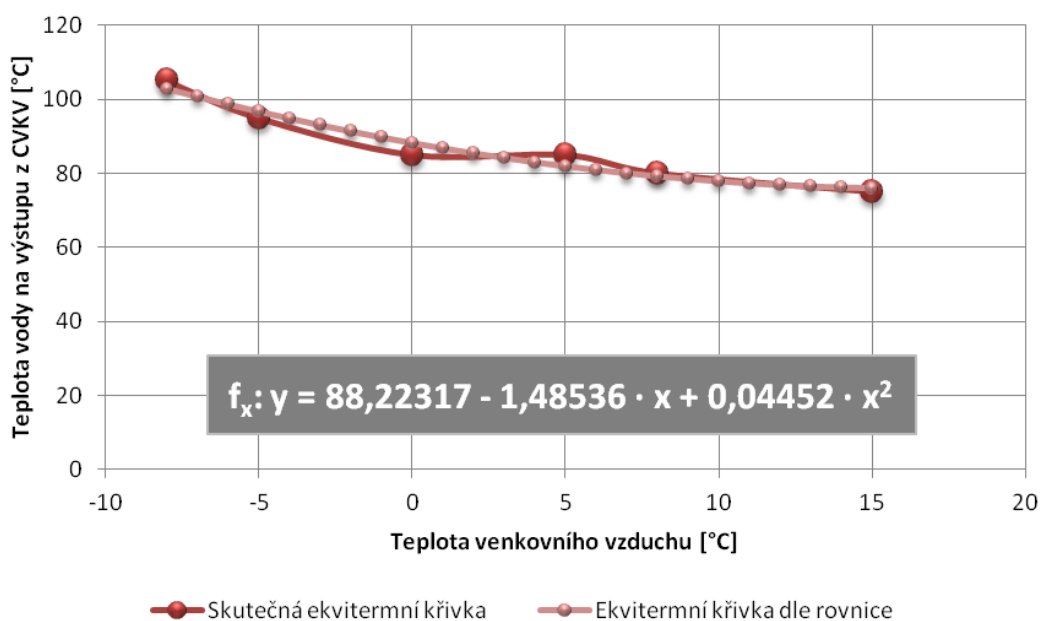
$$\left( \begin{array}{ccc|c} 6 & 15 & 403 & 525 \\ 15 & 403 & 3375 & 875 \\ 403 & 3375 & 60067 & 33215 \end{array} \right)$$

$$\left( \begin{array}{ccc|c} 6 & 15 & 403 & 525 \\ 0 & 365,5 & 2367,50 & -437,50 \\ 0 & 0 & 17663,52 & 786,37 \end{array} \right)$$

$$c_1 = 88,22317$$

$$c_2 = -1,48536$$

$$c_3 = 0,04452$$



**Obr. 68** - Rovnice ekvitemní křivky zdroje tepla (CVKV)

### C.2.5 Stanovení teploty teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla

Pro simulaci budou využity tři varianty teploty teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla.

První variantou je pevně stanovená hodnota ( $t_{w1,konst}$ ). Tato varianta nezohledňuje noční útlumy.

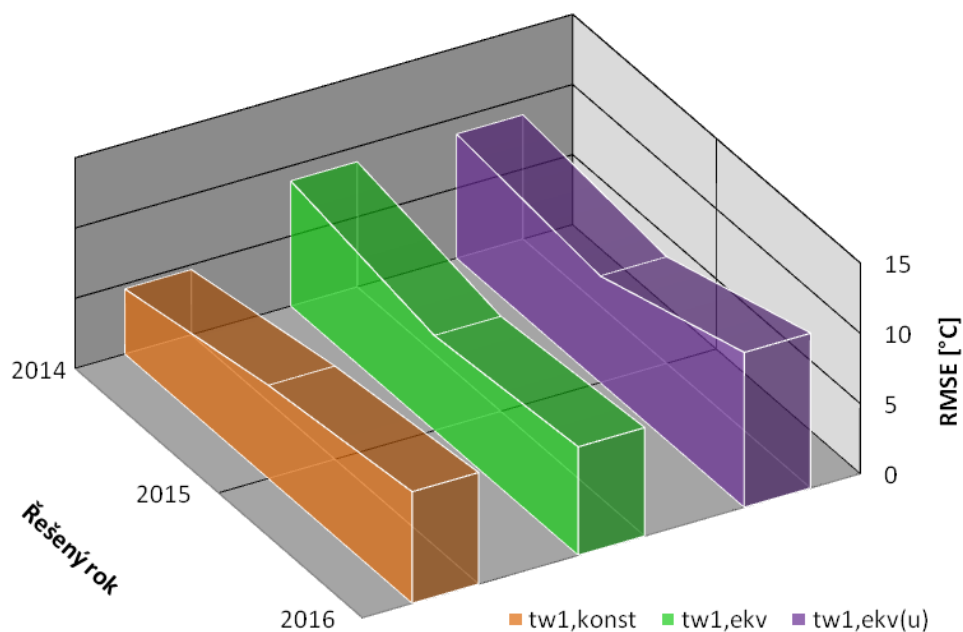
Druhou variantu je možné použít při známé teplotě venkovního vzduchu a rovnice ekvitemní křivky ( $t_{w1,ekv}$ ). V této variantě také nejsou zohledněny noční útlumy.

Třetí varianta vychází z varianty druhé. V této variantě jsou noční útlumy zohledněny ( $t_{w1,ekv(u)}$ ).

Grafické srovnání všech tří variant s reálnými hodnotami ( $t_{w1,real}$ ) je v příloze **P4**. Rok 2014 je zobrazen v grafu **P4a**, rok 2015 v grafu **P4b** a rok 2016 v grafu **P4c**.

Období	Leden 2014	Leden 2015	Leden 2016
RMSE pro $t_{w1,konst}$ [°C]	8,92	6,77	7,72
RMSE pro $t_{w1,ekv}$ [°C]	8,85	7,60	11,03
RMSE pro $t_{w1,ekv(u)}$ [°C]	4,64	6,64	7,94

**Tab. 12** - RMSE pro teplotu teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla



**Graf 19** - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant  $t_{w1}$

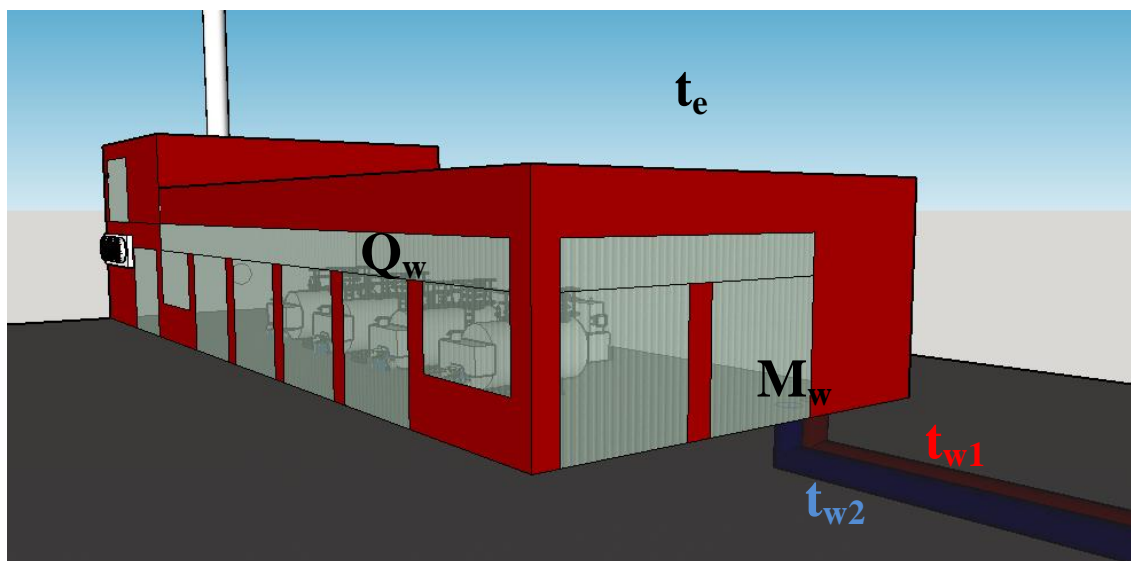
Zobrazením **Tab. 12** formou **Grafu 19** je patrné, že podle RMSE je nejpřesnější varianta s konstantní teplotou teploty teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,konst}$ ).

Podle srovnání průběhů křivek jednotlivých variant s reálným průběhem v grafech v příloze **P4** je však nejpřesnější varianta zohledňující noční útlumy ( $t_{w1,ekv(u)}$ ).

Dynamická simulace bude provedena pro všechny tři varianty.

### C.2.6 Dynamický výpočet predikce

- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1}$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotnosné látky na vstupu do zdroje tepla ( $t_{w2}$ ) - dopočítána v časovém intervalu
- objemový průtok na hranici zdroje tepla ( $M_w$ ) - dopočítán v časovém intervalu
- tepelný výkon zdroje tepla ( $Q_w$ ) - dopočítán v časovém intervalu



**Obr. 69** - Vstupní a výstupní parametry dynamického výpočtu



### **Jednotlivé varianty výpočtu:**

#### **Varianta A1:**

- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,konst}$ ) - zadána v časovém intervalu

#### **Varianta B1:**

- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,ekv}$ ) - zadána v časovém intervalu

#### **Varianta C1:**

- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,ekv(u)}$ ) - zadána v časovém intervalu

#### **Varianta A2:**

- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,konst}$ ) - zadána v časovém intervalu
- zadána korekce teploty vratu od 0:00 do 4:00 (snížení teploty vratu o 5 °C)

#### **Varianta B2:**

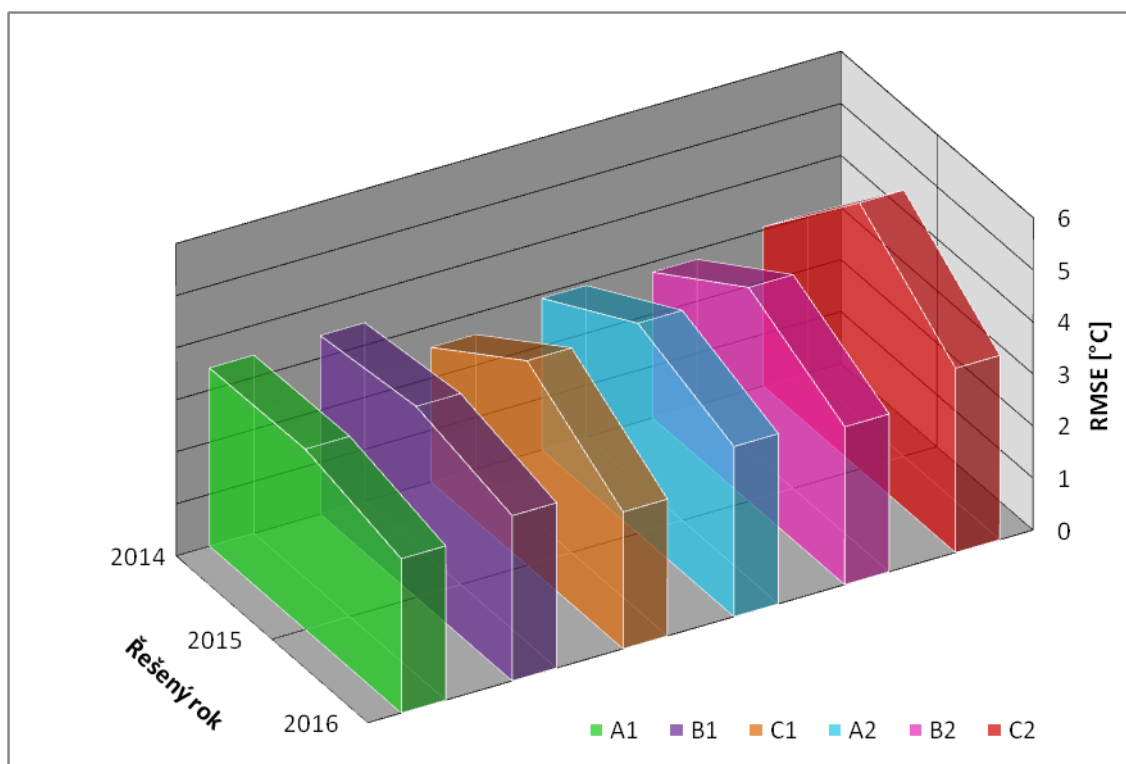
- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,konst}$ ) - zadána v časovém intervalu
- zadána korekce teploty vratu od 0:00 do 4:00 (snížení teploty vratu o 5 °C)

#### **Varianta C2:**

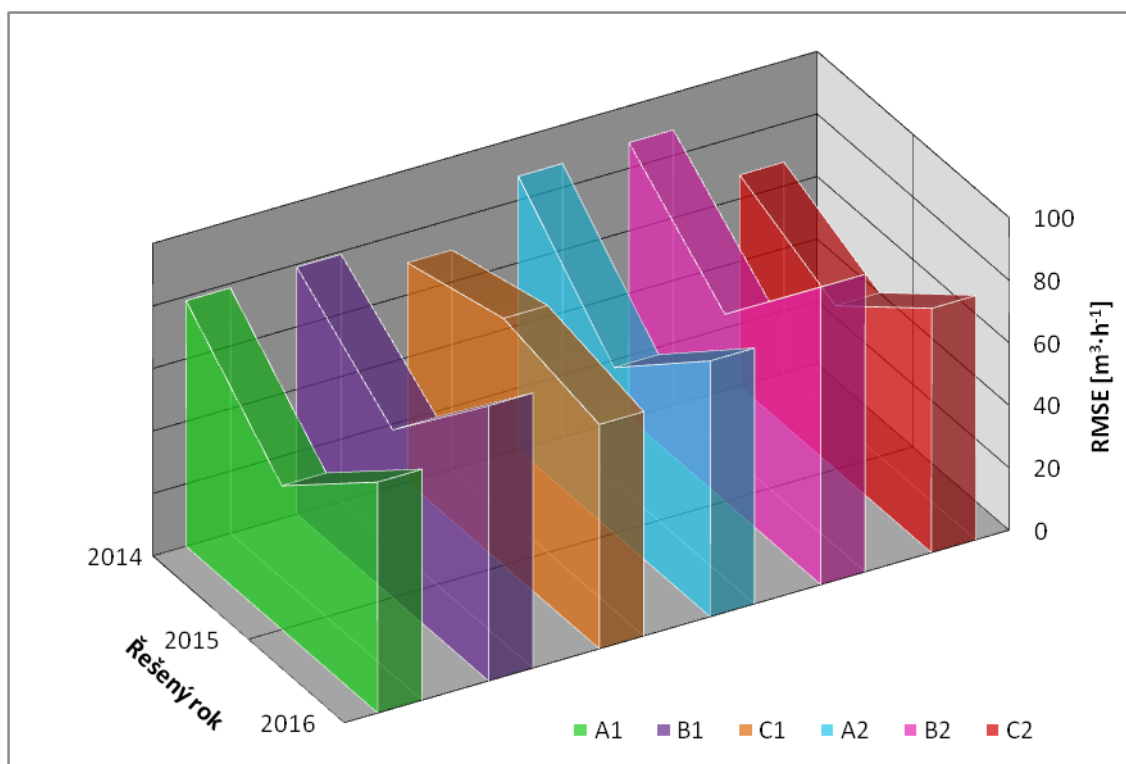
- teplota venkovního vzduchu ( $t_e$ ) - zadána v časovém intervalu
- teplota teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla ( $t_{w1,konst}$ ) - zadána v časovém intervalu
- zadána korekce teploty vratu od 0:00 do 4:00 (snížení teploty vratu o 5 °C)

Varianta	Řešená veličina	Leden 2014	Leden 2015	Leden 2016
A1	$t_{w2}$ [°C]	3,42	3,47	2,96
	$M_w$ [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	78,59	46,01	73,85
	$Q_w$ [MW]	1,02	0,86	1,17
B1	$t_{w2}$ [°C]	3,43	3,67	3,17
	$M_w$ [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	79,08	53,63	87,98
	$Q_w$ [MW]	1,02	0,87	1,17
C1	$t_{w2}$ [°C]	2,59	3,93	2,63
	$M_w$ [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	70,19	79,05	71,75
	$Q_w$ [MW]	1,05	1,09	1,22
A2	$t_{w2}$ [°C]	2,92	4,03	3,27
	$M_w$ [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	87,67	53,08	81,84
	$Q_w$ [MW]	1,00	0,88	1,17
B2	$t_{w2}$ [°C]	2,80	4,11	3,03
	$M_w$ [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	88,19	59,88	95,19
	$Q_w$ [MW]	1,00	0,89	1,17
C2	$t_{w2}$ [°C]	3,04	5,12	3,54
	$M_w$ [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	67,6	52,36	78,15
	$Q_w$ [MW]	1,03	1,10	1,23

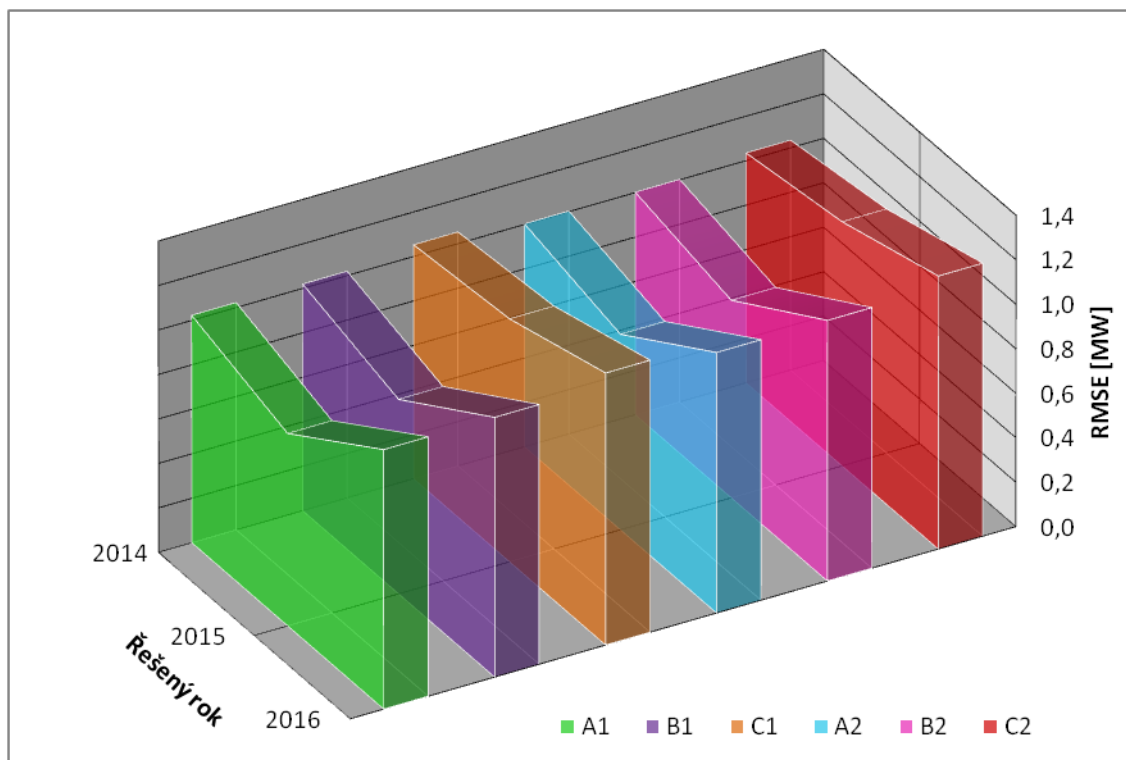
**Tab. 13** - RMSE pro jednotlivé varianty dynamického výpočtu



**Graf 20** - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant  $t_{w2}$



**Graf 21** - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant  $M_w$



**Graf 22** - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant  $Q_w$

Na základě hodnot RMSE a srovnání průběhů simulovaných parametrů s průběhy reálnými jsem určit, že nejpřesněji vyhlíží varianta B2 a varianta C2.

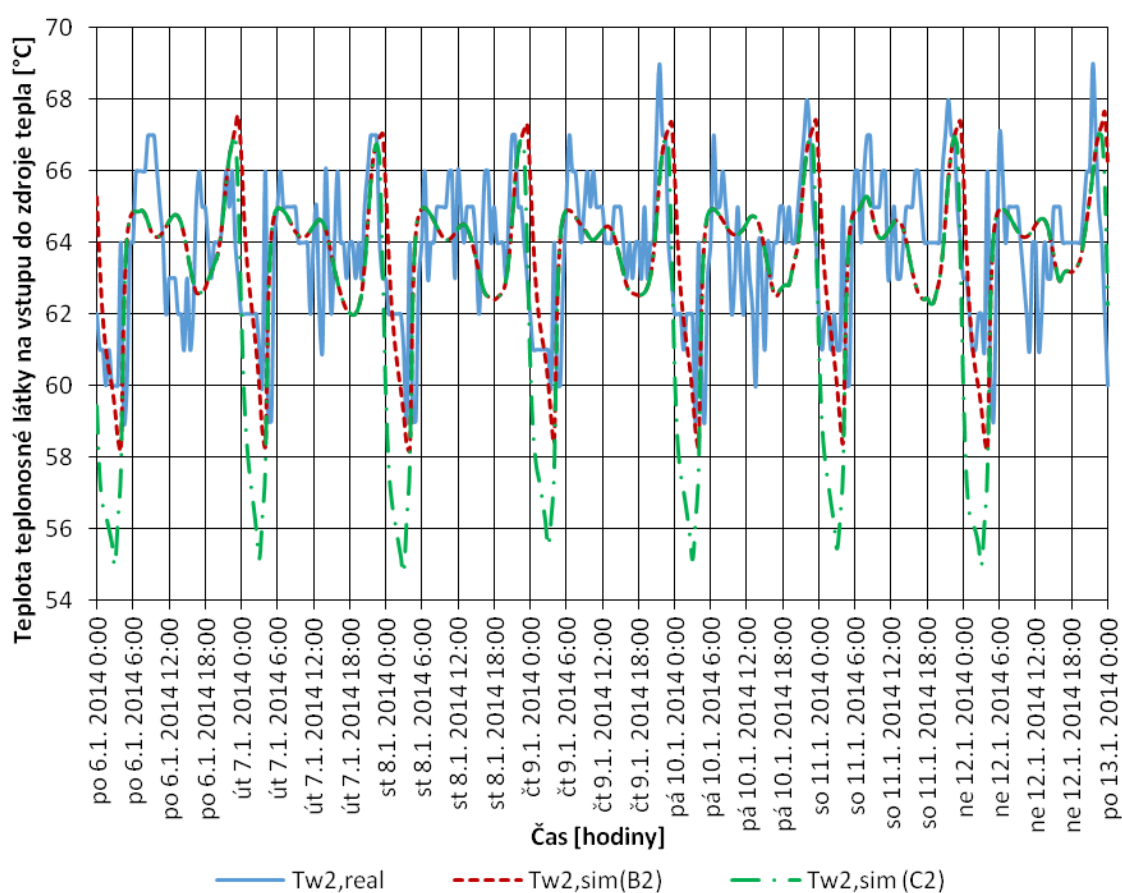
Měsíční průběhy teplot teplotnosné látky na vstupu do zdroje tepla pro tyto varianty jsou zobrazeny pro rok 2014 v příloze **P5**.

Měsíční průběhy objemového průtoku na hranici zdroje tepla pro tyto varianty jsou zobrazeny pro rok 2014 v příloze **P6**.

Měsíční průběhy tepelného výkonu zdroje tepla pro tyto varianty jsou zobrazeny pro rok 2014 v příloze **P7**.

### C.2.6.1 Týdenní predikovaný průběh teploty teplotnosné látky na vstupu do zdroje tepla

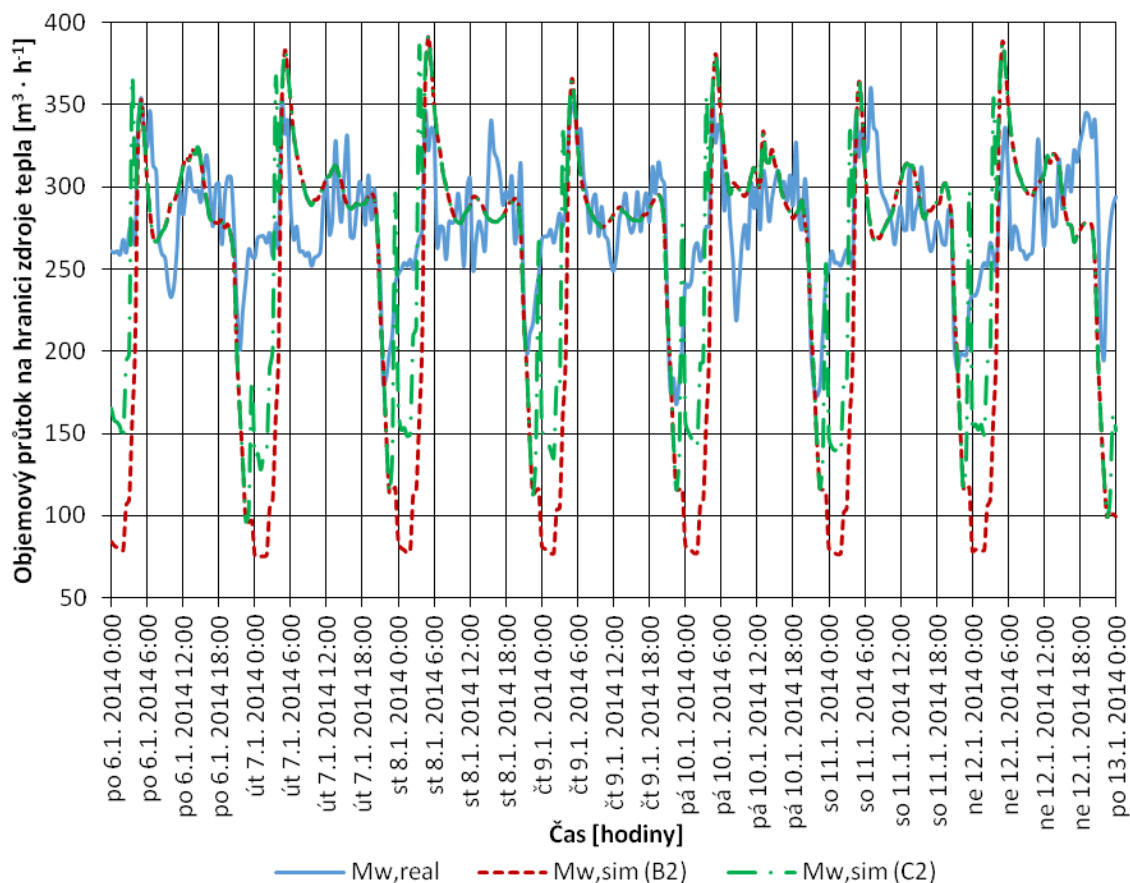
Dle **Grafu 23** je přesnější varianta B2. Odchyly mezi variantou B2 a C2 vznikají v době nočního útlumu. Jelikož byl ve variantě C2 zohledněn v okrajových podmínkách noční útlum (byla zadána hodnota teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla dle ekvitemní křivky s nočním útlumem), klesá teplota níže než u varianty B2, ve které nebyl při zadávání teploty teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla noční útlum uvažován (hodnota teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla byla zadána pouze dle rovnice ekvitemní křivky).



**Graf 23** - Týdenní predikovaný průběh teploty teplotnosné látky na vstupu do zdroje tepla

### C.2.6.2 Týdenní predikovaný průběh objemového průtoku na hranici zdroje tepla

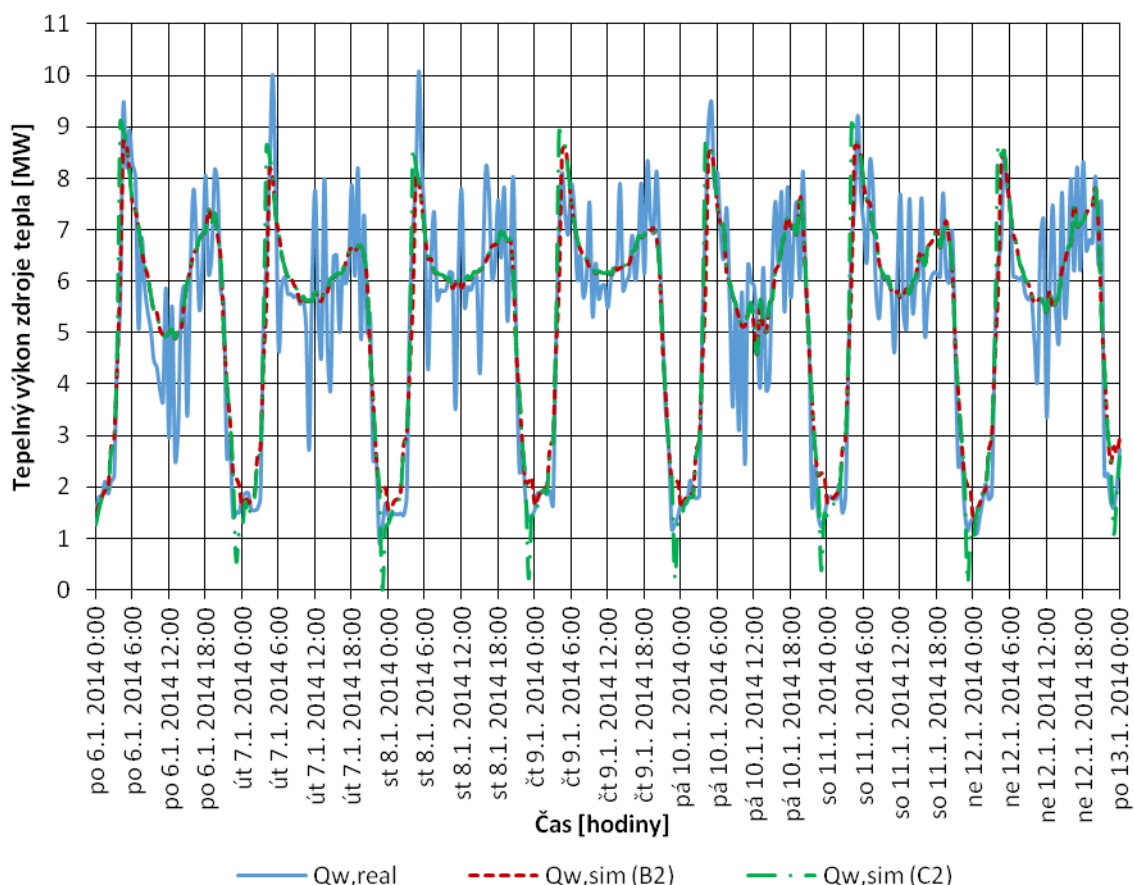
Z **Grafu 24** je možné usoudit, že průběhy variant B2 a C2 jsou v pořádku (v době nočního útlumu klesá objemový průtok v obou variantách a jejich průběh se mezi nimi příliš neliší).



**Graf 24** - Týdenní predikovaný průběh objemového průtoku na hranici zdroje tepla

### C.2.6.3 Týdenní predikovaný průběh tepelného výkonu zdroje tepla

Průběhy predikovaného tepelného výkonu jsou dle **Grafu 25** téměř pro obě varianty stejné. Pouze u varianty C2 nastává před 0:00 pokles na velmi nízkou hodnotu. Příčinu lze přiřadit k velmi nízkému rozdílu teplot mezi výstupem a vstupem do zdroje tepla. Co se tedy týče přesnosti, je varianta B2 přesnější.



**Graf 25** - Týdenní predikovaný průběh tepelného výkonu zdroje tepla

### C.2.7 Závěrečné zhodnocení výstupů počítačové simulace

Dle průběhů v **Grafu 23**, **Grafu 24** a **Grafu 25** je možné usoudit, že varianta B2 je nejpřesnější. Docílit stejných hodnot reálných a predikovaných parametrů je nemožné, jelikož do reálného průběhu zasahuje odběratel tepla (člověk). Cílem počítačové simulace bylo přiblížit se reálným průběhům parametrů, které ovlivňují dodávku tepla ke spotřebiteli tepla.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámení se soustavou centralizovaného zásobování teplem (SCZT), hydraulikou teplovodní tepelné sítě a následnou aplikací na zadané teplovodní tepelné síti.

Analýza tématu - byl proveden obecný úvod do řešeného tématu - seznámení se soustavou centralizovaného zásobování teplem (SCZT). Dále bylo téma směřováno k hydraulice teplovodní tepelné sítě.

Aplikace tématu - toto téma bylo rozděleno na dvě části. První část se zabývala analýzou provozu řešené tepelné sítě, sestavením a porovnáním tlakových diagramů za daných provozů (zimní a letní provoz). Druhá část byla věnována tepelně - hydraulickému výpočtu zadané tepelné sítě pomocí použitého softwaru a výpočtu mému dle používaných vztahů. Výsledky byly srovnány graficky. Také byly zobrazeny výstupy vybraných tepelně - hydraulických charakteristik z použitého softwaru pro celou teplovodní tepelnou síť.

Experimentální řešení a počítačová simulace - v experimentálním řešení jsem se zaměřil na stanovení množství dodaného tepla na základě měření ultrazvukovým průtokoměrem a příložných teplotních sond. Měření probíhalo v domovní předávací stanici bytového domu. Bylo stanoveno pouze dodané teplo pro vytápění. Výsledek byl porovnán s měřičem tepla umístěným v domovní předávací stanici. Cílem počítačové simulace bylo přiblížit se reálné dodávce tepla ze zdroje tepla na řešené tepelné síti v zimním období. Simulace byla provedena pro tři roky a šest variant výpočtu ve stejném měsíci (leden). Výstupy nejlepších variant z počítačové simulace byly srovnány graficky s reálnými hodnotami.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN 38 3350 - *Zásobování teplem - všeobecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, 1988.
- [2] *Pražská teplárenská: Schéma dodávky tepla* [online]. [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: <https://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/jak-to-funguje/schema-vyroby-a-dodavek-tepla/schema-dodavky-tepla/>
- [3] *Úvod do zásobování teplem: Zdroje tepla pro soustavy CZT* [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/ZZT-P1-potreba-tepla-vykonu-navrh-zdroje.pdf>
- [4] BAŠTA, Jiří, Karel BROŽ, Jiří CIKHART, Miroslav ŠTORKAN a Vladimír VALENTA. *Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách a na Moravě*. Praha: GAS, 2001. ISBN 80-861-7681-9.
- [5] DUFKA, Jaroslav. *Vytápění: pro 3. ročník učebního oboru instalatér. 2., přeprac. vyd.* Praha: Sobotáles, 2011. ISBN 978-80-86817-43-9.
- [6] *Tenza: Předizolované potrubí* [online]. [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivita/obchod/predizolovane-potrubi/>
- [7] *Pražská teplárenská: Předávací stanice* [online]. [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <https://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/jak-to-funguje/schema-vyroby-a-dodavek-tepla/predavaci-stanice/>
- [8] *Pražská teplárenská: Základní pojmy v zásobování teplem* [online]. [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <https://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/prakticke-informace-pro-zakazniky/zakladni-pojmy-v-zasobovani-teplem/>
- [9] *Stavební klub: Předávací stanice tepla* [online]. [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: [https://www.stavebniklub.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOJ0sxwBR3d1Xau7WzRWuROfoz27aFII0BA](https://www.stavebniklub.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOJ0sxwBR3d1Xau7WzRWuROfoz27aFII0BA)
- [10] ČUPR, Karel, Josef GÖTZ a Günter GEBAUER. *Aplikovaná fyzika pro technická zařízení budov*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1991. ISBN 80-214-0266-0.

- [11] *TZB - info: Vybrané výpočetní vztahy pro vlastnosti vody* [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/41-vybrane-vypocetni-vztahy-pro-vlastnosti-vody>
- [12] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [13] JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-739-0.
- [14] *Tepelné sítě - hydraulický výpočet: Třetí ztráta* [online]. [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/ZZT-P3-hydraulika.pdf>
- [15] HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ. *Hydraulika: příklady*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1162-3.
- [16] VENDLOVÁ, Lucie a Marcela POČINKOVÁ. *BT01 - TZB II - Vytápění: sbírka příkladů*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2014. Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. ISBN 978-80-214-4982-4.
- [17] *Mechanika tekutin: Ultrazvukové průtokoměry* [online]. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: [http://uzpet.af.mendelu.cz/wcd/w-af-uzpet/soubory-ke-stazeni/proudeni\\_ztraty\\_mereni\\_prutoku.pdf](http://uzpet.af.mendelu.cz/wcd/w-af-uzpet/soubory-ke-stazeni/proudeni_ztraty_mereni_prutoku.pdf)
- [18] *Teplárny Brno: Mapa rozvodů* [online]. [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/mapa-rozvodu/>
- [19] KAŠÍK, Zbyněk. *Má pára budoucnost? (I): O vodní páře všeobecně* [online]. 2002 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/979-ma-para-budoucnost-i>
- [20] KOTRBATÝ, Miroslav, Ondřej HOJER a Josef POUBA. *Vytápění průmyslových a velkoprostorových objektů (X)* [online]. 2006 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/3591-vytapani-prumyslovych-a-velkoprostorovych-objektu-x](http://www.tzb-info.cz/3591-vytapani-prumyslovych-a-velkoprostorovych-objektu-x)
- [21] *Teplárny Brno (výkresová dokumentace)*

- [22] KOMÍNEK, Petr, *Energie a systémy TZB v inteligentních regionech - predikce tepla pro soustavy centrálního zásobování teplem*, teze Ph.D. práce, VUT FAST, 2017
- [23] *Statistics How To: What is Root Mean Square Error (RMSE)?* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.statisticshowto.com/rmse/>

V diplomové práci byla použita data poskytnutá a naměřená v rámci projektu TAČR CK Smart Regions.

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

## Zkratky

DHS	district heating system
SCZT	soustava centralizovaného zásobování teplem
KVET	kombinovaná výroba elektrické energie a tepla
PVC	polyvinylchlorid
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
TZB	technická zařízení budov
CVKV	centrální výtopna Kamenný vrch
KGJ	kogenerační jednotka
VZT	vzduchotechnika
DPS	domovní předávací stanice
HKST	hladina konstantního statického tlaku
RMSE	Root Mean Square Error - odmocninová střední čtvercová chyba

## Symbody a matematicko - fyzikální veličiny

$p_{sw}$	- tlak na mezi sytosti pro vodu [kPa]
$\rho_w$	- měrná hmotnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$t_w$	- teplota vody [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$c_w$	- měrná tepelná kapacita vody [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$\lambda_w$	- měrná tepelná vodivost vody [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$\eta_w$	- dynamická viskozita vody [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\nu_w$	- kinematická viskozita vody [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$Q_P$	- přípojný tepelný výkon řešeného úseku [W]
$Q_{VYT}$	- suma všech tepelných výkonů pro vytápění v řešeném úseku [W]
$Q_{VZT}$	- suma všech tepelných výkonů pro vzduchotechniku v řešeném úseku [W]
$Q_{TV}$	- suma všech tepelných výkonů pro ohřev teplé vody v řešeném úseku [W]
$Q_{TECH}$	- suma všech tepelných výkonů pro technologii v řešeném úseku [W]

$Q_{P,celk}$	- celkový přípojný výkon v řešeném úseku [W]
$Q_z$	- tepelná ztráta potrubních rozvodů v řešeném úseku [W]
$m_w$	- hmotnostní průtok [ $kg \cdot s^{-1}$ ]
$A_p$	- plocha průřezu potrubí kolmá k proudu [ $m^2$ ]
$w$	- rychlost proudění v daném průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$t_{w1}$	- teplota teplotonosné látky - vody v přívodním potrubí [ $^{\circ}C$ ]
$t_{w2}$	- teplota teplotonosné látky - vody ve vratném potrubí [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta t_w$	- ochlazení teplotonosné látky po předání tepla [K]
$M_w$	- objemový průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$h$	- polohová (statická) výška v daném průřezu [m]
$p$	- tlak v potrubí [Pa]
$g$	- gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$\alpha_i$	- Coriolisovo číslo [-]
$h_z$	- ztrátová výška mechanické energie [m]
$Re$	- Reynoldsovo číslo [-]
$d_{pi}$	- vnitřní průměr potrubí [m]
$Z$	- celková tlaková ztráta [m]
$Z_T$	- tlaková ztráta třením [m]
$Z_{MO}$	- tlaková ztráta místními odpory [m]
$\Delta p_T$	- tlaková ztráta třením [Pa]
$\lambda_T$	- součinitel tření [-]
$l_p$	- délka potrubí [m]
$k_p$	- ekvivalentní drsnost stěny potrubí [mm]
$r_p$	- poměrná drsnost stěny potrubí [-]
$\Delta p_{MO}$	- tlaková ztráta místními odpory [Pa]
$\xi_{MO}$	- součinitel místních ztrát [-]
$M_{\xi}$	- objemový průtok oběhovým čerpadlem [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]
$H_{\xi}$	- dopravní výška oběhového čerpadla [m]
$Q_{zp}$	- tepelná ztráta potrubí [W]
$R_p$	- tepelný odpor potrubí [ $m \cdot K \cdot W^{-1}$ ]
$Q_c$	- tepelný výkon [W]
$P_c$	- dodané teplo [J; GJ]
$\tau$	- časový interval [s]

$\tau_1$	- počátek časového intervalu [s]
$\tau_2$	- konec časového intervalu [s]
RMSE	- Root Mean Square Error - odmocninová střední čtvercová chyba
$n$	- počet hodnot vstupujících do výpočtu
$x_i$	- skutečná hodnota
$\bar{x}_i$	- predikovaná hodnota
$f_x$	- funkce rovnice
$\varphi_i$	- vektor
$c_i$	- neznámé koeficienty
$t_e$	- teplota venkovního vzduchu

# SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

## Obrázky

<b>Obr. 1</b> - Schéma dodávky tepla mezi zdrojem tepla a odběrným místem .....	13
<b>Obr. 2</b> - Schéma distribuce tepelné energie [2] .....	13
<b>Obr. 3</b> - Schéma jednotrubkové sítě .....	16
<b>Obr. 4</b> - Schéma dvoutrubkové stě .....	16
<b>Obr. 5</b> - Schéma třítrubkové sítě .....	17
<b>Obr. 6</b> - Paprskovitá síť [4] .....	17
<b>Obr. 7</b> - Okružní síť [4] .....	18
<b>Obr. 8</b> - Mřížová síť [4] .....	18
<b>Obr. 9</b> - Vedení potrubí [4] .....	19
<b>Obr. 10</b> - Tepelný kanál [5] .....	19
<b>Obr. 11</b> - Řez městským kolektorem [4] .....	20
<b>Obr. 12</b> - Vedení potrubí v hydrofobním zásypu [4] .....	20
<b>Obr. 13</b> - Vedení předizolovaného potrubí [5] .....	21
<b>Obr. 14</b> - Předizolované potrubí [6] .....	21
<b>Obr. 15</b> - Schéma předávací stanice [7] .....	22
<b>Obr. 16</b> - Zjednodušené schéma tlakově závislé předávací stanice pro vytápění (voda - voda) s přímým regulačním ventilem [20] .....	23
<b>Obr. 17</b> - Zjednodušené schéma tlakově závislé předávací stanice pro vytápění (voda - voda) se směšovacím ejektorem [20] .....	23
<b>Obr. 18</b> - Zjednodušené schéma tlakově nezávislé předávací stanice pro vytápění (voda - voda) .....	24
<b>Obr. 19</b> - Grafické znázornění rovnice kontinuity .....	33
<b>Obr. 20</b> - Grafické znázornění Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu [10] .....	34
<b>Obr. 21</b> - Znázornění proudění v potrubí [10] .....	35
<b>Obr. 22</b> - Moodyho diagram [15] .....	40
<b>Obr. 23</b> - Tlakový diagram .....	43
<b>Obr. 24</b> - Mapa řešené lokality .....	45
<b>Obr. 25</b> - Obecné schéma SCZT v řešené lokalitě .....	46
<b>Obr. 26</b> - Detailnější schéma SCZT v řešené lokalitě .....	47
<b>Obr. 27</b> - CVKV (zdroj tepla) .....	48
<b>Obr. 28</b> - Technologické schéma CVKV [21] .....	49
<b>Obr. 29</b> - Trasy potrubí (paprskovitá síť) [21] .....	55
<b>Obr. 30</b> Řešená tepelná síť a její části [18] .....	56
<b>Obr. 31</b> - Typická domovní předávací stanice [21] .....	59
<b>Obr. 32</b> - Části tvořící výpočtový model teplovodní tepelné sítě .....	66
<b>Obr. 33</b> - Výpočtový model tepelné sítě v softwaru MOP .....	66
<b>Obr. 34</b> - Zdroje tepla .....	69
<b>Obr. 35</b> - Znázornění cesty pro vykreslení tlakového diagramu .....	72

<b>Obr. 36</b> - Paralelní zapojení dvou stejných čerpadel .....	76
<b>Obr. 37</b> - Označení řešených úseků .....	77
<b>Obr. 38</b> - Schéma pro určení teploty počátečního uzlu.....	77
<b>Obr. 39</b> - Schéma pro určení tepelné ztráty .....	78
<b>Obr. 40</b> - Schéma pro určení objemového průtoku.....	78
<b>Obr. 41</b> - Schéma pro určení ochlazení.....	79
<b>Obr. 42</b> - Schéma pro určení teploty koncového uzlu .....	79
<b>Obr. 43</b> - Schéma pro určení střední teploty .....	79
<b>Obr. 44</b> - Přenášený výkon [MW].....	87
<b>Obr. 45</b> - Přívod: Vnitřní průměr [mm] .....	88
<b>Obr. 46</b> - Přívod: Tepelné ztráty na 1 m délky potrubí [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ] .....	88
<b>Obr. 47</b> - Přívod: Hmotnostní průtok [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] .....	89
<b>Obr. 48</b> - Přívod: Střední rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] .....	89
<b>Obr. 49</b> - Přívod: Střední Reynoldsovo číslo [-] .....	90
<b>Obr. 50</b> - Přívod: Drsnost potrubí [mm] .....	90
<b>Obr. 51</b> - Přívod: Změna hydrostatického tlaku [kPa] .....	91
<b>Obr. 52</b> - Přívod: Nejvyšší přetlak [kPa] .....	91
<b>Obr. 53</b> - Schéma polohy čidel při měření dodávky tepla pomocí měřiče tepla.....	93
<b>Obr. 54</b> - Schéma experimentálního měření dodávky tepla (poloha čidel měřicí techniky) .....	93
<b>Obr. 55</b> - Vysílání a přijímání ultrazvukového signálu [17].....	94
<b>Obr. 56</b> - Měření teplot teplotnosné látky před a po předání tepla spotřebiteli .....	95
<b>Obr. 57</b> - Postup pro stanovení dodaného tepla .....	96
<b>Obr. 58</b> - Záznamové zařízení ultrazvukového průtokoměru PT878 .....	97
<b>Obr. 59</b> - Příložený snímač ultrazvukového průtokoměru PT878 .....	98
<b>Obr. 60</b> - Kompletní sestava ultrazvukového průtokoměru PT878 .....	98
<b>Obr. 61</b> - Kontaktní materiál - gel.....	99
<b>Obr. 62</b> - COMET S0141 .....	100
<b>Obr. 63</b> - Příložená teplotní sonda Pt 1000.....	101
<b>Obr. 64</b> - Řešený objekt zásobovaný teplem .....	101
<b>Obr. 65</b> - Poloha měřidel v tlakově závislé předávací stanici v řešeném bytovém domě102	
<b>Obr. 66</b> - Odečet z měřiče tepla .....	106
<b>Obr. 67</b> - Umístění teplotní sondy v jímce.....	107
<b>Obr. 68</b> - Rovnice ekvitemní křivky zdroje tepla (CVKV) .....	110
<b>Obr. 69</b> - Vstupní a výstupní parametry dynamického výpočtu .....	112

## Tabulky

<b>Tab. 1</b> - Teplotnosné látky v primární a sekundární síti.....	22
<b>Tab. 2</b> - Vztahy pro stanovení součinitele tření hydraulicky hladkých potrubí [15] .....	38
<b>Tab. 3</b> - Ekvivalentní drsnost stěny potrubí v závislosti na jeho povrchu [4].....	39
<b>Tab. 4</b> - Vztah pro stanovení součinitele tření v kvadratické oblasti ztrát třením [15]..	39
<b>Tab. 5</b> - Vztahy pro stanovení součinitele tření v přechodné oblasti ztrát třením [15]..	40



<b>Tab. 6</b> - Teplota teplotonosné látky pro jednotlivé období (řezy).....	71
<b>Tab. 7</b> - Procentuální rozdělení tepelného výkonu zdroje tepla pro jednotlivé období (řezy).....	72
<b>Tab. 8</b> - Výstup hodnot: Řez pro zimu (-8 °C).....	73
<b>Tab. 9</b> - Výstup hodnot: Řez pro zimu (0 °C).....	74
<b>Tab. 10</b> - Výstup hodnot: Řez pro léto (20 °C).....	75
<b>Tab. 11</b> - Skutečné hodnoty určující ekvitemní křivku .....	109
<b>Tab. 12</b> - RMSE pro teplotu teplotonosné látky na výstupu ze zdroje tepla.....	111
<b>Tab. 13</b> - RMSE pro jednotlivé varianty dynamického výpočtu .....	114

## Grafy

<b>Graf 1</b> - Tlak na mezi sytosti vody v závislosti na její teplotě.....	25
<b>Graf 2</b> - Závislost měrné hmotnosti vody na její teplotě .....	26
<b>Graf 3</b> - Závislost měrné tepelné kapacity vody na její teplotě .....	27
<b>Graf 4</b> - Závislost měrné tepelné vodivosti vody na její teplotě .....	28
<b>Graf 5</b> - Závislost dynamické viskozity vody na její teplotě .....	29
<b>Graf 6</b> - Závislost kinematické viskozity vody na její teplotě .....	30
<b>Graf 7</b> - Ekvitemní křivka CVKV .....	48
<b>Graf 8</b> - Ekvitemní křivka DPS .....	58
<b>Graf 9</b> - Leden - týdenní průběh teplot teplotonosné látky .....	60
<b>Graf 10</b> - Leden - týdenní průběh objemového průtoku .....	61
<b>Graf 11</b> - Leden - týdenní průběh tepelného výkonu .....	62
<b>Graf 12</b> - Červenec - týdenní průběh teploty teplotonosné látky .....	63
<b>Graf 13</b> - Červenec - týdenní průběh objemového průtoku .....	64
<b>Graf 14</b> - Červenec - týdenní průběh tepelného výkonu.....	65
<b>Graf 15</b> - Diagram trvání teploty teplotonosné látky .....	70
<b>Graf 16</b> - Diagram trvání tepelného výkonu zdroje tepla .....	70
<b>Graf 17</b> - Určení teplot teplotonosné látky pro jednotlivé řezy .....	71
<b>Graf 18</b> - Určení tepelného výkonu zdroje tepla pro jednotlivé řezy .....	72
<b>Graf 19</b> - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant $t_{w1}$ .....	111
<b>Graf 20</b> - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant $t_{w2}$ .....	115
<b>Graf 21</b> - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant $M_w$ .....	115
<b>Graf 22</b> - Grafické srovnání RMSE jednotlivých variant $Q_w$ .....	116
<b>Graf 23</b> - Týdenní predikovaný průběh teploty teplotonosné látky na vstupu do zdroje tepla .....	117
<b>Graf 24</b> - Týdenní predikovaný průběh objemového průtoku na hranici zdroje tepla. ....	118
<b>Graf 25</b> - Týdenní predikovaný průběh tepelného výkonu zdroje tepla .....	119

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**P1** - Příklady součinitele místního odporu pro hydraulicky krátká potrubí

**P2** - Grafické znázornění měsíčních průběhů analyzovaných parametrů

**P3** - Tlakové diagramy pro jednotlivé řezy

**P4** - Skutečný a predikovaný průběh teplot teplonosné látky na výstupu ze zdroje tepla pro měsíc leden 2014, leden 2015 a leden 2016


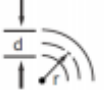
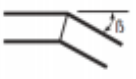

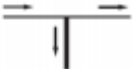
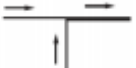

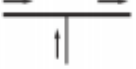
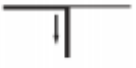

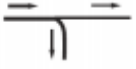
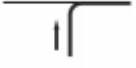

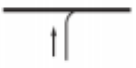











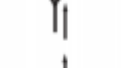
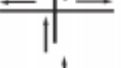
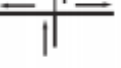
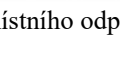
**P5** - Skutečný a predikovaný průběh teploty teplonosné látky na vstupu do zdroje tepla pro měsíc leden 2014

**P6** - Skutečný a predikovaný průběh objemového průtoku na hranici zdroje tepla pro měsíc leden 2014

**P7** - Skutečný a predikovaný průběh tepelného výkonu zdroje tepla pro měsíc leden 2014

## P1 - Příklady součinitele místního odporu pro hydraulicky krátká potrubí

Potrubí z mědi – součinitel místních odporů  $\xi$  pro pitnou vodu (PV), ústřední vytápění (T), plyn (P)

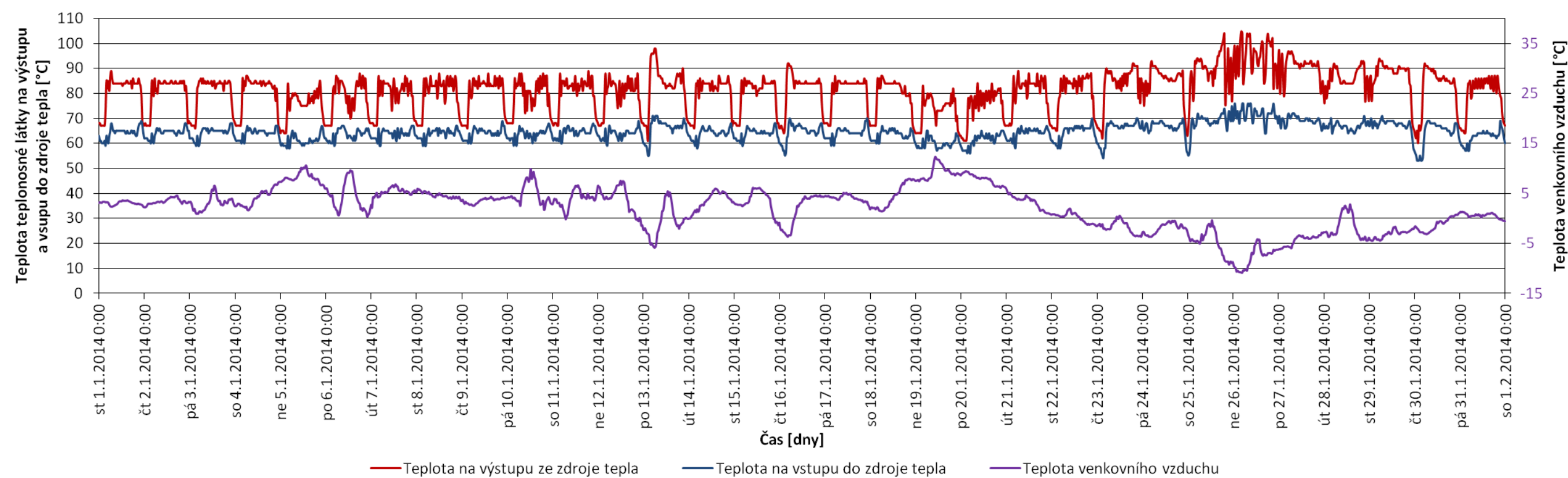
Symbol	Označení	$\xi$	Použití		
			PV	T	P
	Koleno nebo oblouk (směrný údaj podle DIN 1988 T3 a TRGI)	0,70	*	*	*
	Oblouk 90° r/d=0,5	1,00	*	*	*
	(r/d=1,2	0,35	*	*	*
	u tvarovek dle	2,0	*	*	*
	a DIN 29856 č. 11)	3,0	*	*	*
	Koleno	B=90°	1,30	*	*
		60°	0,80	*	*
		45°	0,40	*	*
	Shybka	0,5	*	*	*
	Odbočka, pravouhlá Dělení proudů	1,30	*	*	*
	Spojení proudů	0,90	*	*	*
	Průchod - dělení proudů	0,30	*	*	*
	Průchod - spojení proudů	0,60	*	*	*
	Protiproud - spojení proudů	3,00	*	*	*
	Protiproud - dělení proudů	1,50	*	*	*
	Odbočka, oblouková Dělení proudů	0,90	*	*	*
	Spojení proudů	0,40	*	*	*
	Průchod - dělení proudů	0,30	*	*	*
	Průchod - spojení proudů	0,20	*	*	*
	Rozdělovač - výstup	0,50	*	*	*
	Sběrač - vstup	1,00	*	*	*
	Zásobník				
	Výstup	0,50	*	*	*
	Vstup	1,00	*	*	*
	Redukce	0,40	*	*	*
	Zúžení plynulé	B=30°	0,02	*	*
		45°	0,04	*	*
		60°	0,07	*	*
	Rozšíření plynulé	B=10°	0,10	*	*
		20°	0,15	*	*
		30°	0,20	*	*
		40°	0,20	*	*
	Dilatační oblouk	1,00	*	*	*
	Kompenzátor	2,00	*	*	*
	Kompenzátor	2,00	*	*	*
	Čistící T-kus 90°	1,30			*
	Čistící oblouk T	0,90			*
	Dvojitý oblouk T - protiproud (úsek „G“ končí tvarovkou)	1,30			*
	Křížový kus 90° Dělení proudů Průchod	1,30			*
	Křížový kus 90° Dělení proudů Odbočka	2,00			*

P1a - Příklady součinitele místního odporu [16]

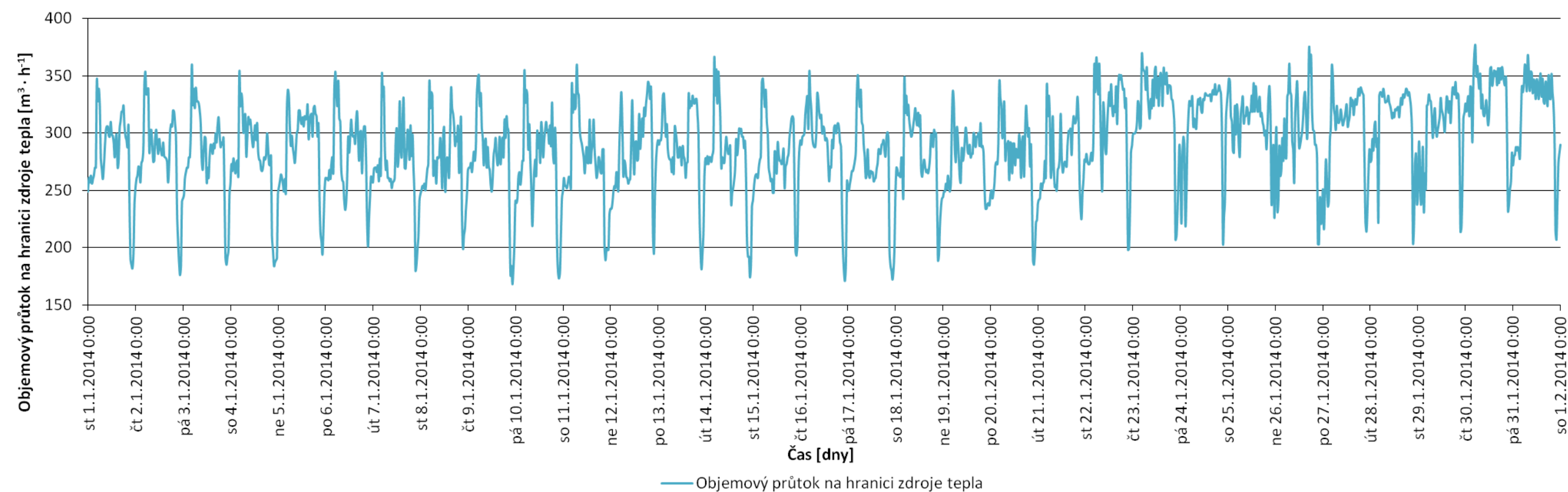
Symbol	Označení	$\zeta$	Použití		
			PV	T	P
	Čistící kříž 90° Dělení proudů Průchod	0,50			•
	Čistící kříž 90° Dělení průchodů Odbočka	1,3			•
	Přípojka	DN 25			•
	Hrdlo GZ	> DN 25			•
	Uzavírací ventily Přímé ventily	DN 15	10,0	•	•
		DN 20	8,5	•	•
		DN 25	7,0	•	•
		DN 32	6,0	•	•
		DN 40 až DN 100	5,0	•	•
	Šikmé ventily	DN 15	3,5	•	•
		DN 20	2,5	•	•
		DN 25 až DN 50	2,0	•	•
		DN 65	0,7	•	•
	Rohové ventily	DN 10	7,0	•	•
		DN 15	4,0	•	•
		DN 20	2,0	•	•
		DN 50	3,5	•	•
		DN 65 až DN 100	4,0	•	•
	Membránové ventily	DN 15	10,0	•	
		DN 20	8,5	•	
		DN 25	7,0	•	
		DN 32	6,0	•	
		DN 40 až DN 100	5,0	•	
	Uzavírací šoupata, pístová šoupata, kulové kohouty	DN 10 až DN 15	1,0	•	•
		DN 20 až DN 25	0,5	•	•
		DN 32 až DN 150	0,3	•	•
	Ventil na topném tělese - Průchod	4,0		•	
	Ventil na topném tělese - Rohový ventil	2,0		•	
	Uzavírací kohout (kuželový) průchozí	2,0			•
	Uzavírací kohout (kuželový) rohový připojovací armatura	5,0			•
	Uzavírací kohout (kuželový) průchozí	0,5			•
	Uzavírací kohout (kuželový) rohový	1,3			•
	Zpětná klapka	DN 15 až DN 20	7,7	•	
		DN 25 až DN 40	4,3	•	
		DN 50	3,8	•	
		DN 65 až DN 100	2,5	•	
	Průchozí ventil se zpětnou klapkou	DN 20	6,0	•	
		DN 25 až DN 50	5,0	•	
	Navrtávací pás pro ventil	DN 25 až DN 80	5,0	•	
	Redukční ventil zcela otevřený	30,0		•	
	Kotel	2,5		•	
	Článekové otopné těleso	2,5		•	
	Deskové topné těleso	3,0		•	

**P1b** - Příklady součinitele místního odporu [16]

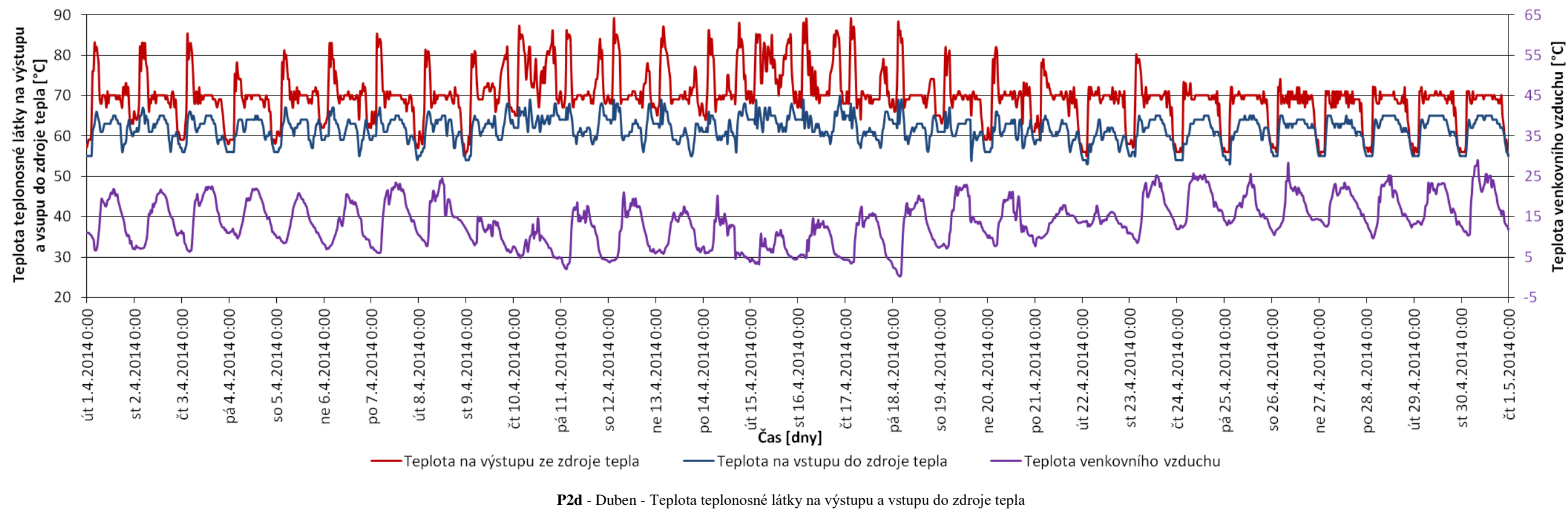
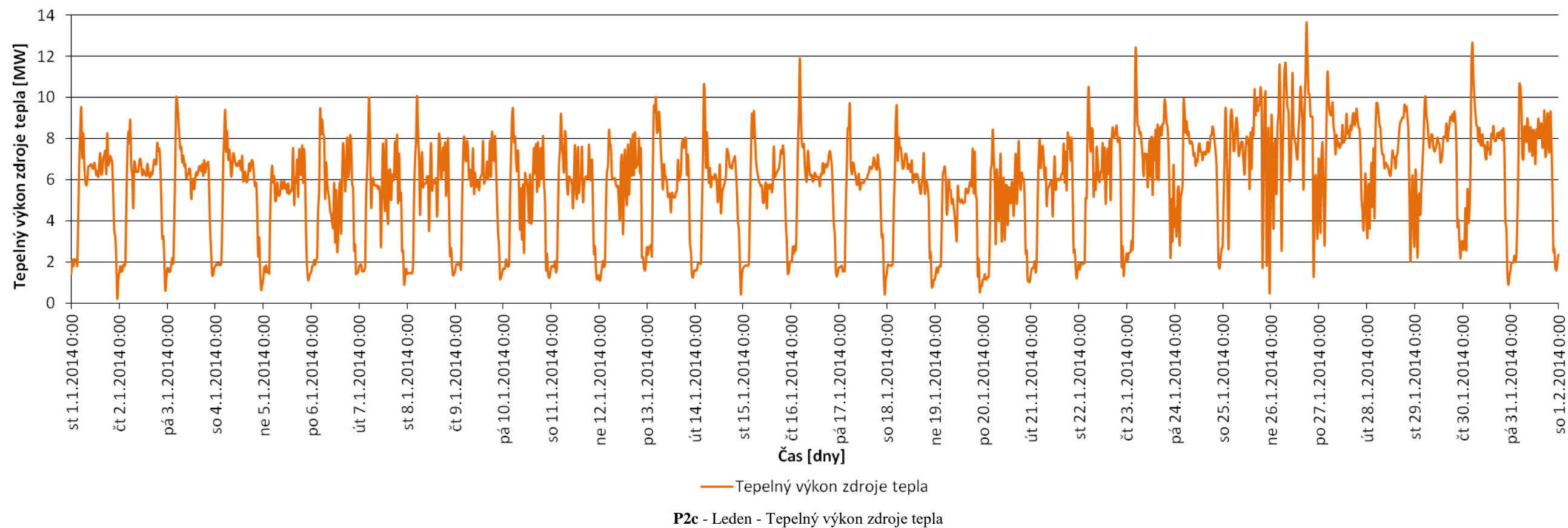
P2 - Grafické znázornění měsíčních průběhů analyzovaných parametrů



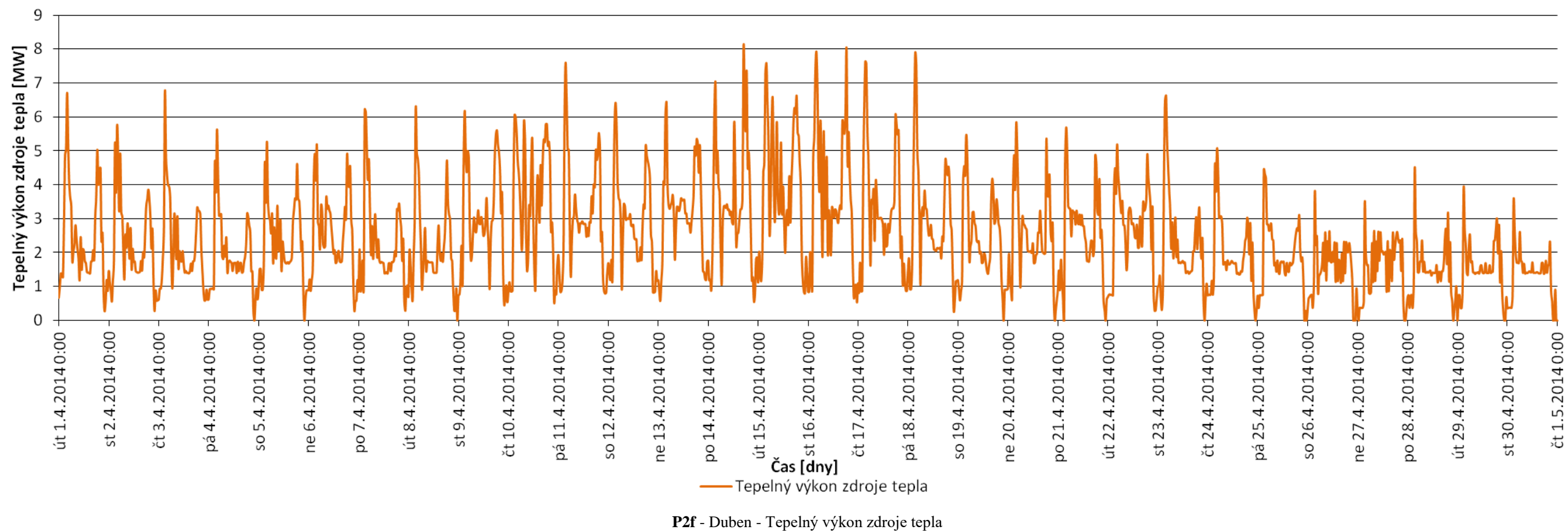
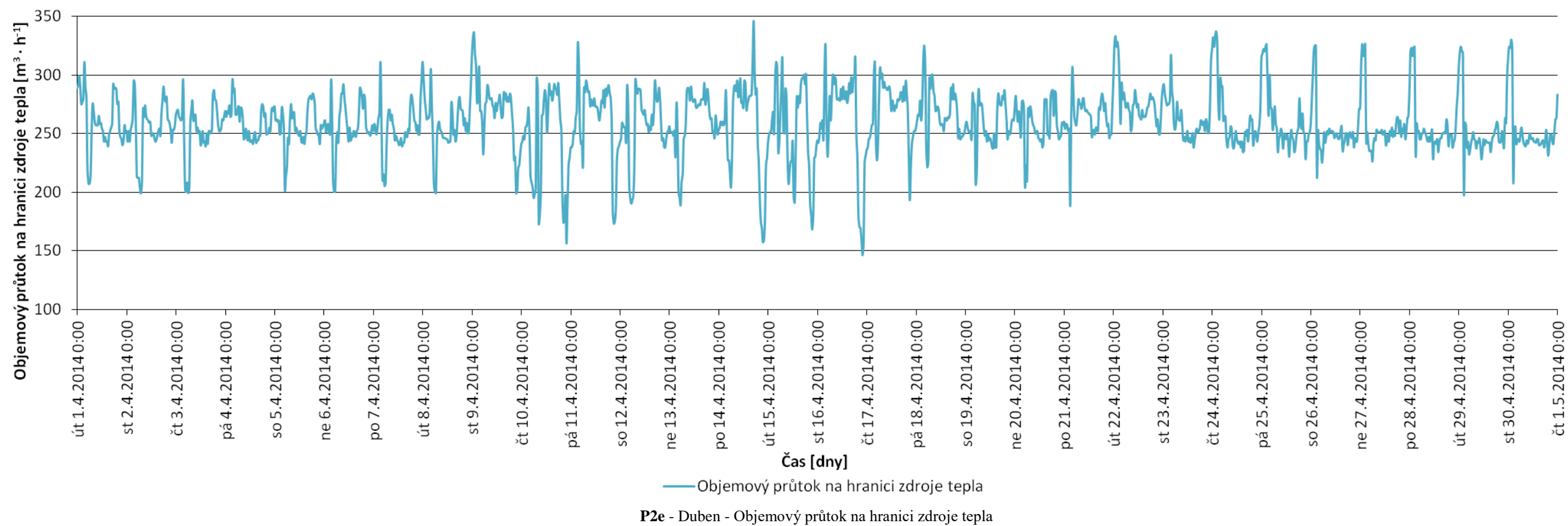
P2a - Leden - teplota teplotnosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla

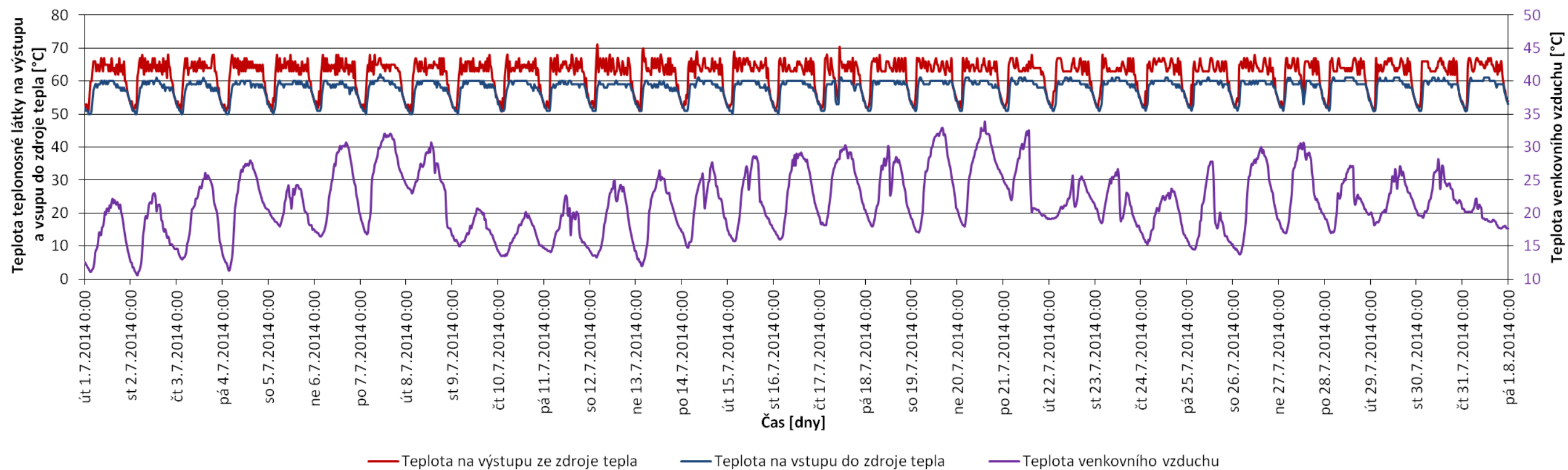


P2b - Leden - objemový průtok na hranici zdroje tepla

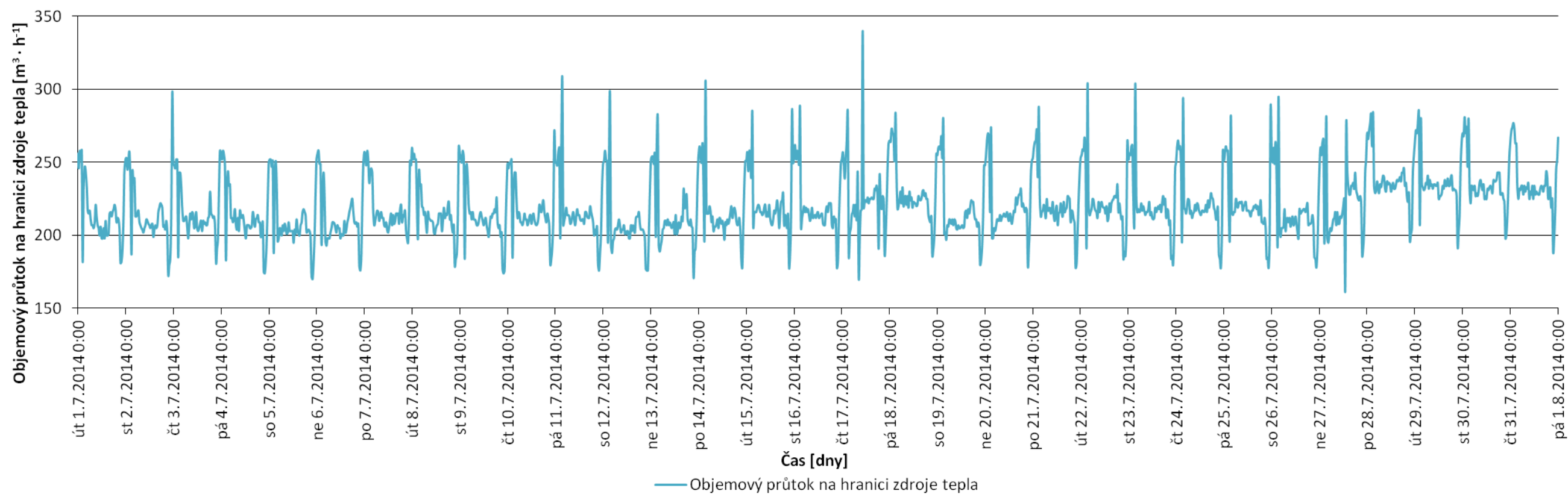






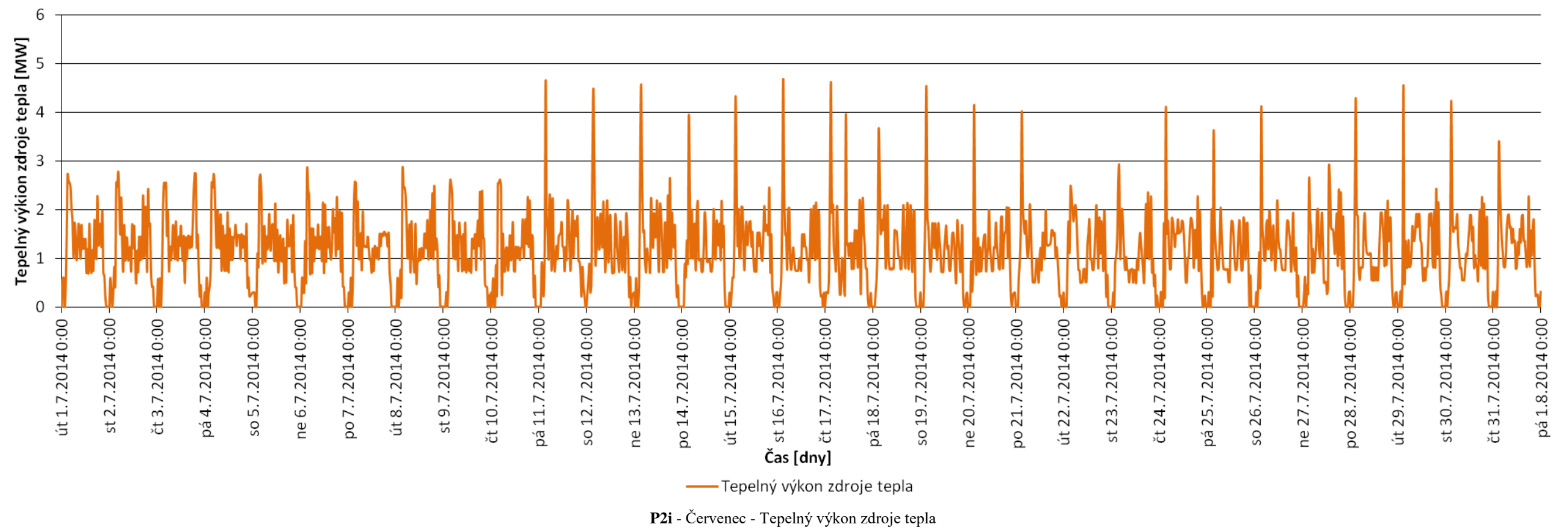


**P2g** - Červenec - Teplota teplosnosné látky na výstupu a vstupu do zdroje tepla

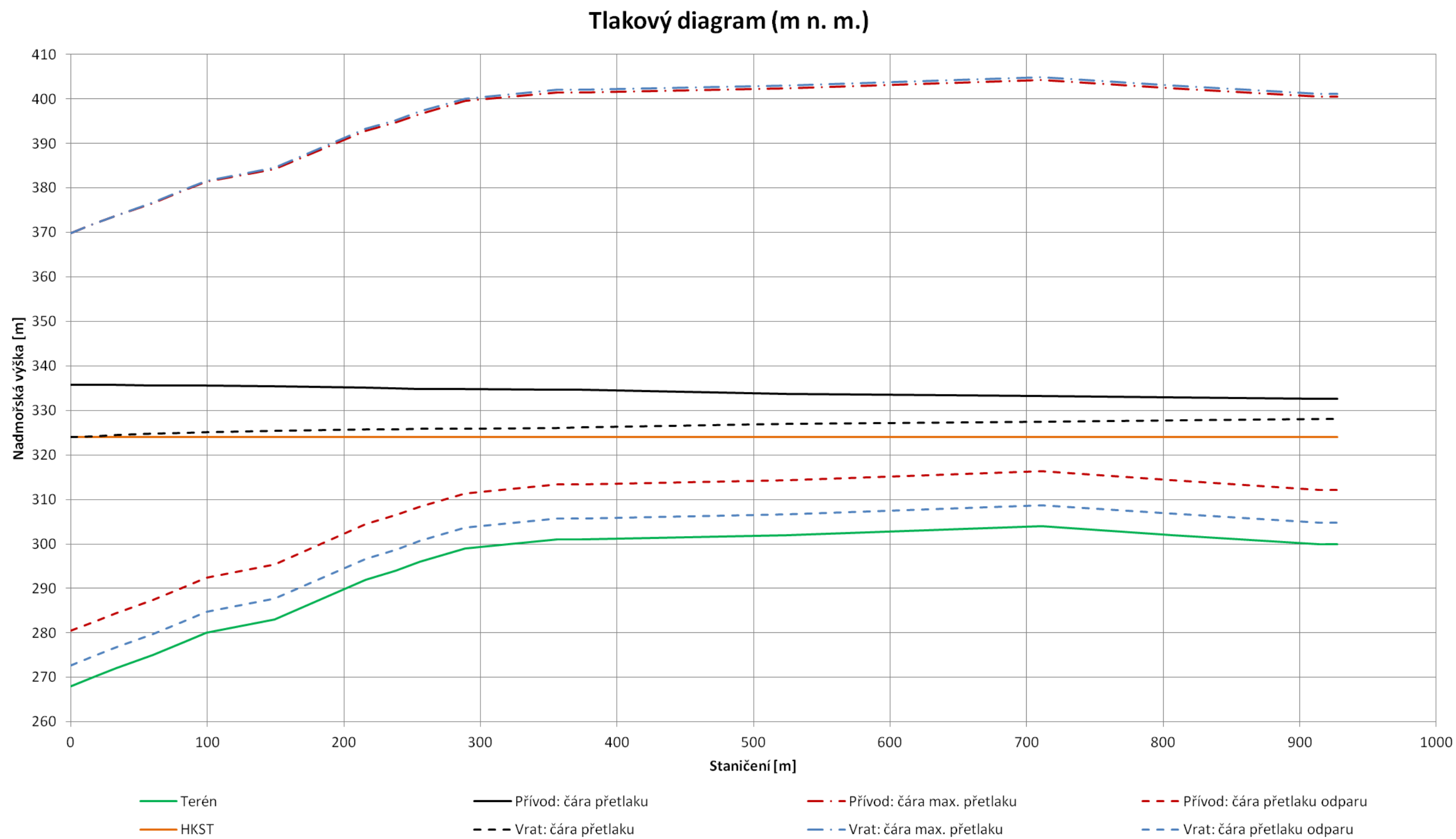


**P2h** - Červenec - Objemový průtok na hranici zdroje tepla



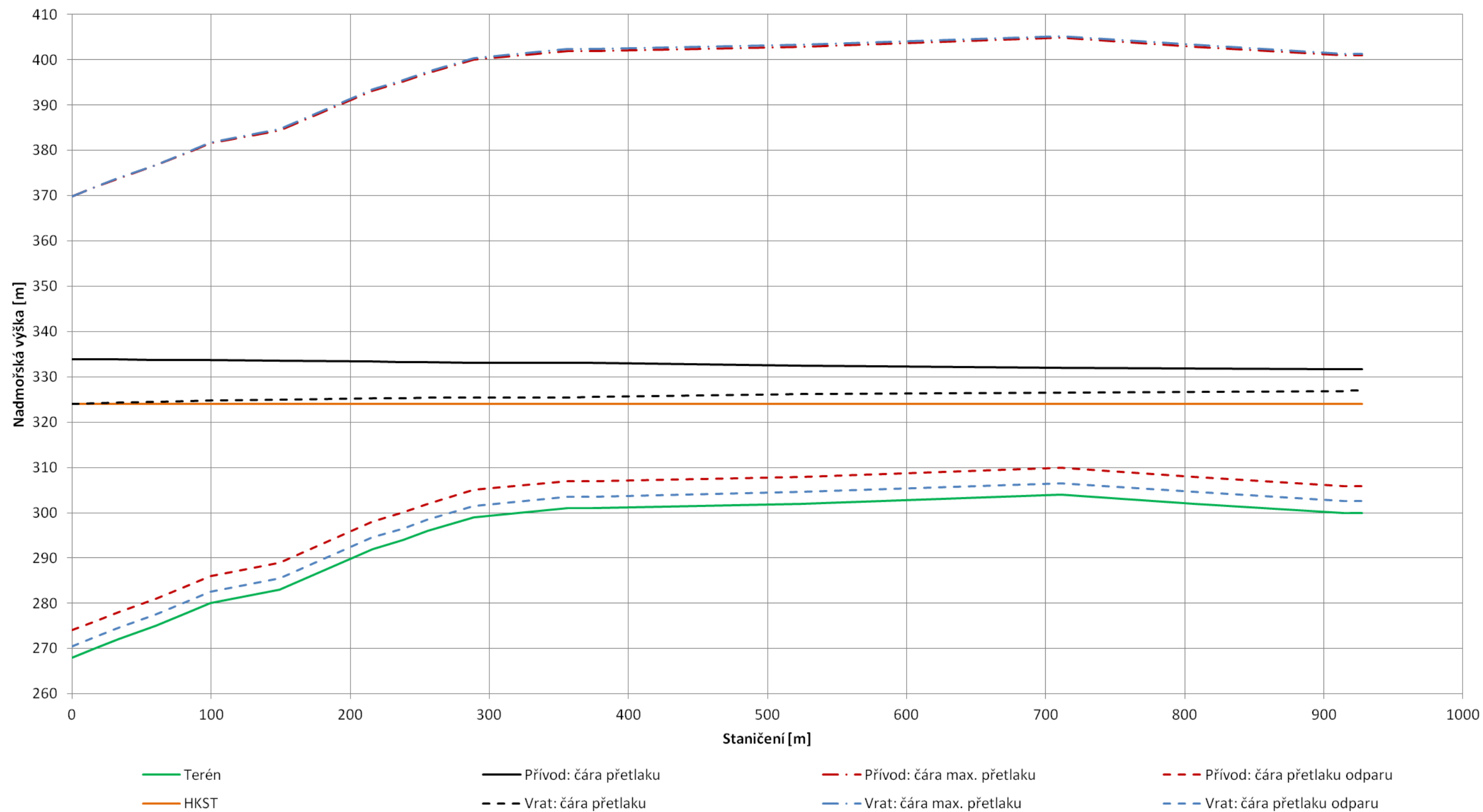


**P3** - Tlakové diagramy pro jednotlivé řezy



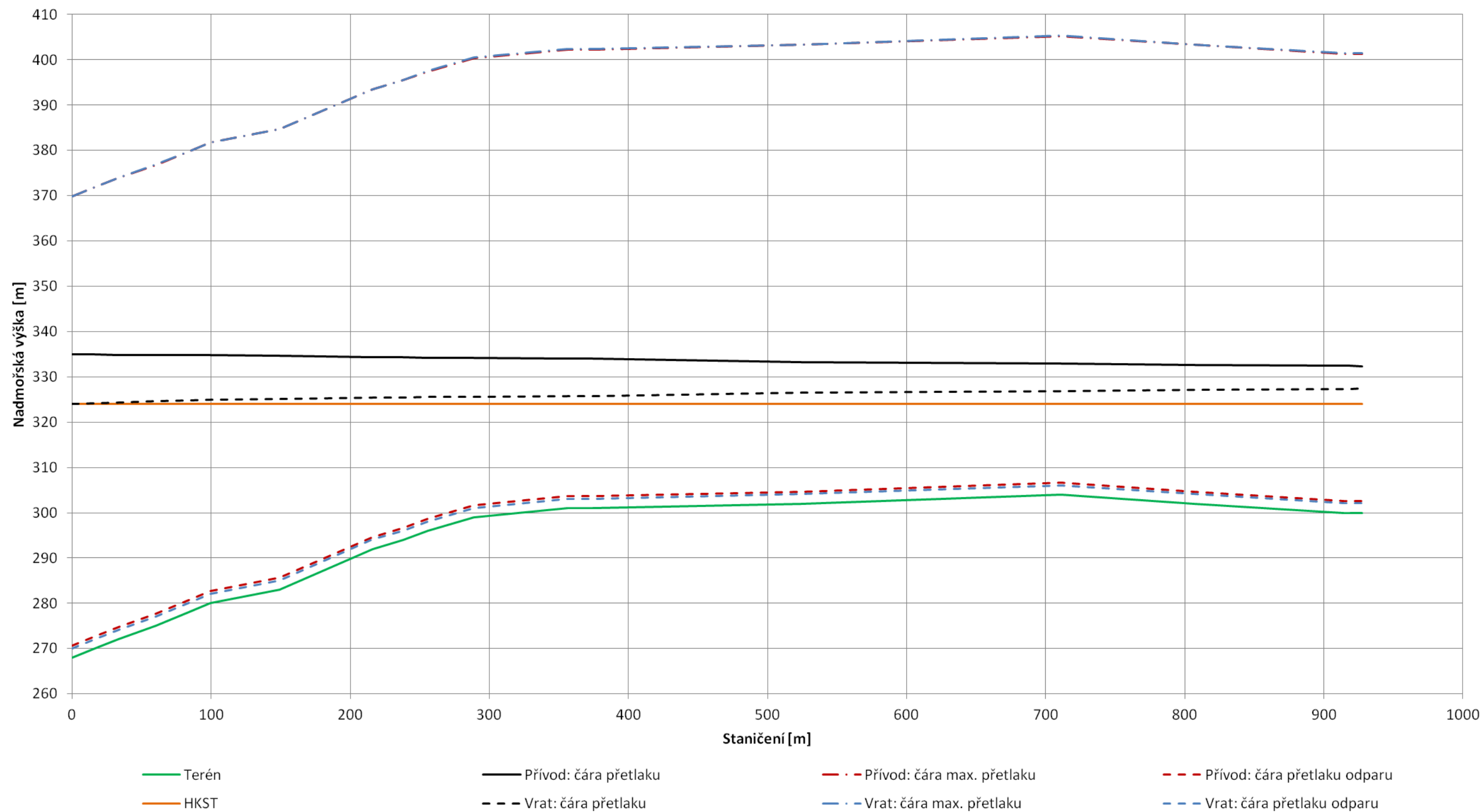
**P3a** - Tlakový diagram pro zimní období (Řez pro -8 °C)

# Tlakový diagram (m n. m.)



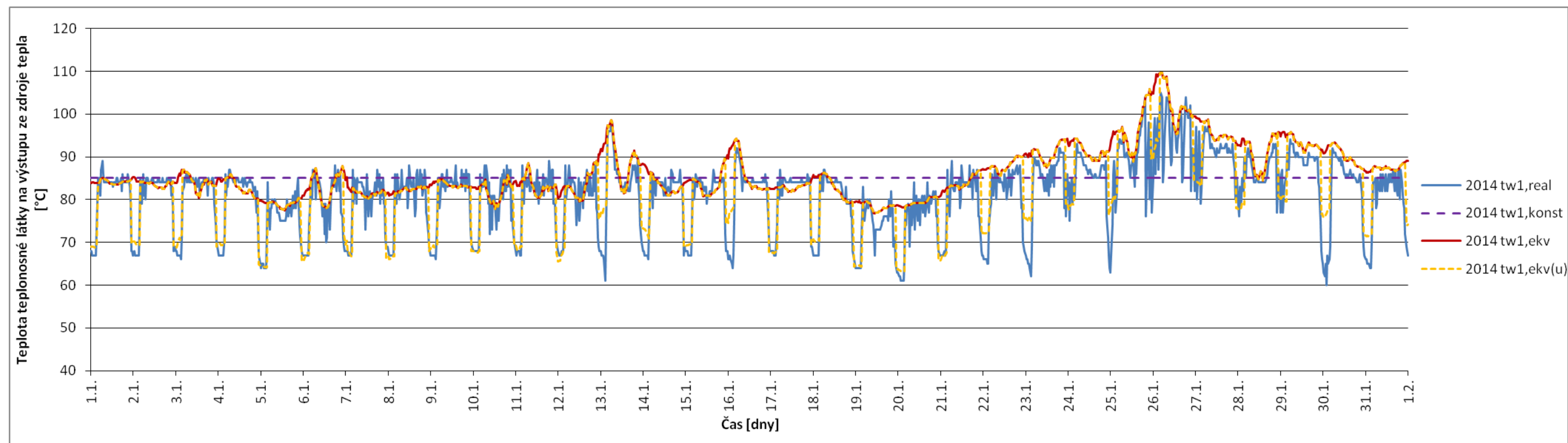
**P3b** - Tlakový diagram pro zimní období (Řez pro 0 °C)

# Tlakový diagram (m n. m.)

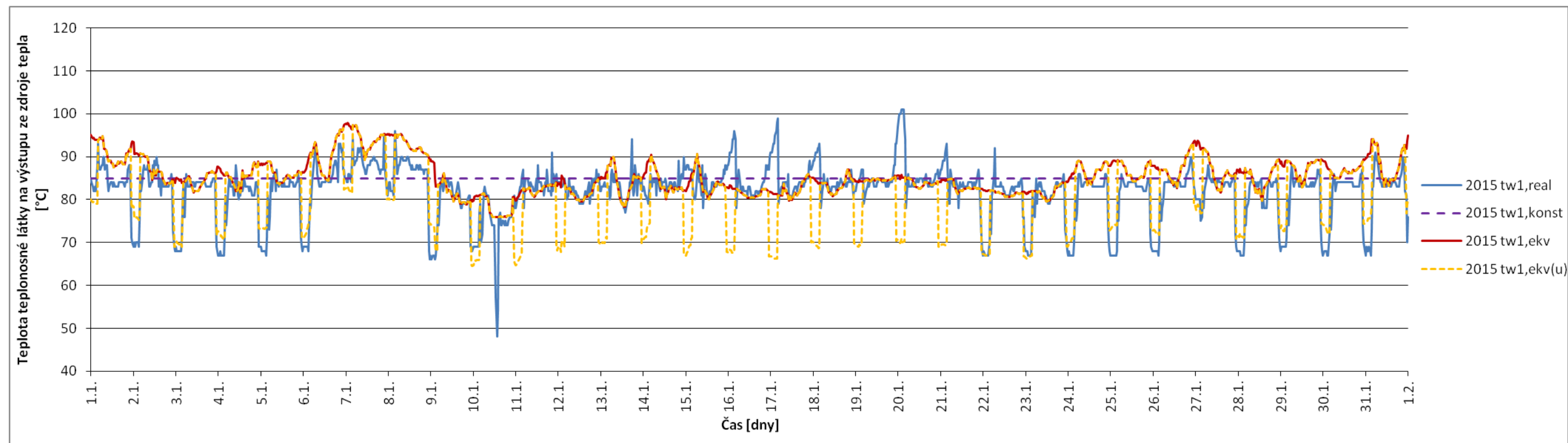


**P3c** - Tlakový diagram pro letní období (Řez pro 20 °C)

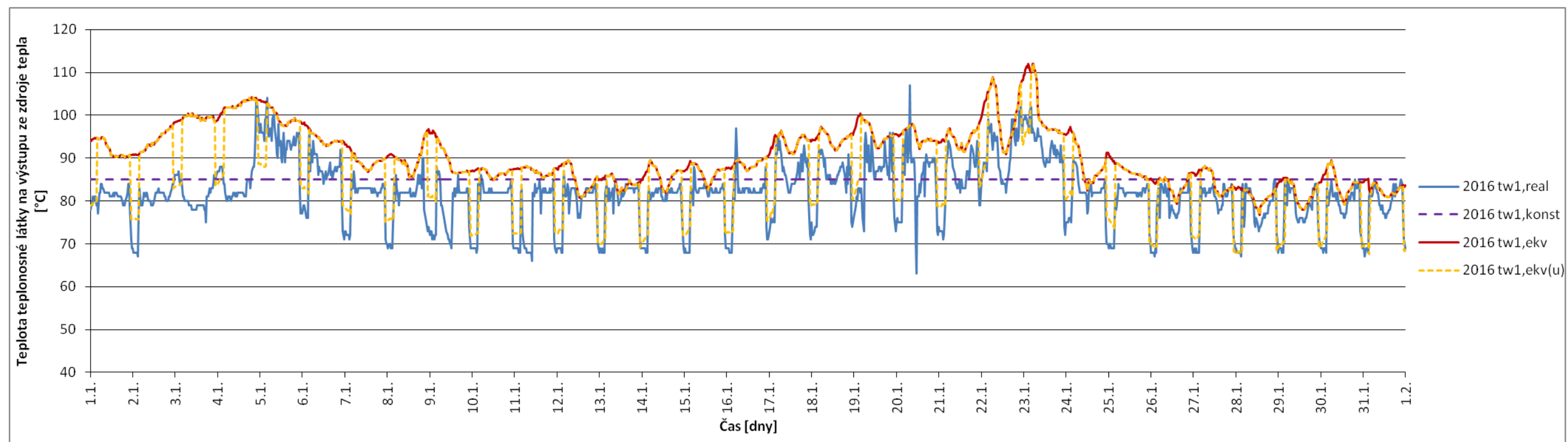
**P4** - Skutečný a predikovaný průběh teplot teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla pro měsíc leden 2014, leden 2015 a leden 2016



**P4a** - Grafické srovnání průběhu teplot teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla pro leden 2014

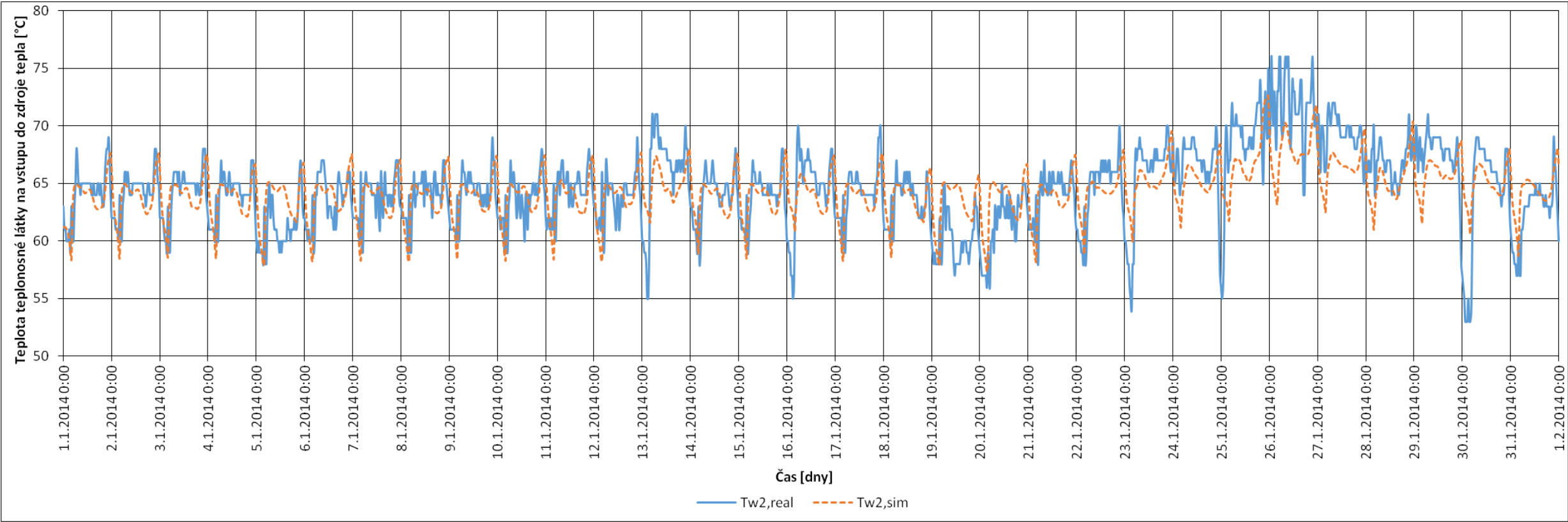


**P4b** - Grafické srovnání průběhu teplot teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla pro leden 2015

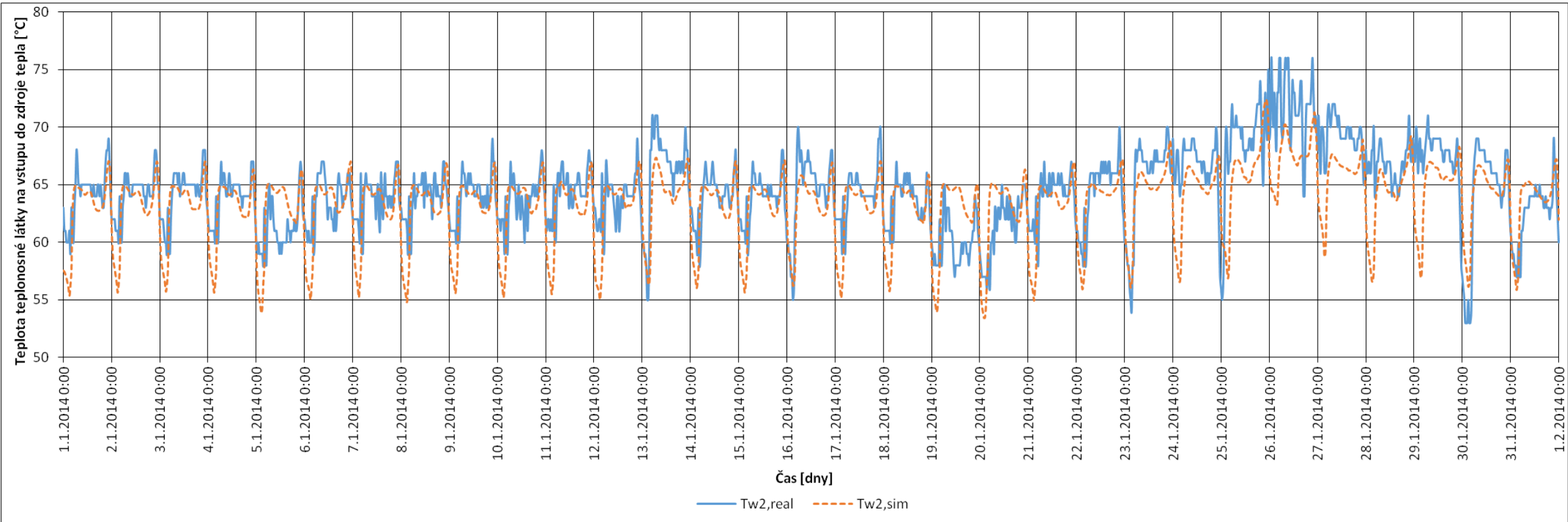


**P4c** - Grafické srovnání průběhu teplot teplotnosné látky na výstupu ze zdroje tepla pro leden 2016

**P5** - Skutečný a predikovaný průběh teploty teplotnosné látky na vstupu do zdroje tepla pro měsíc leden 2014



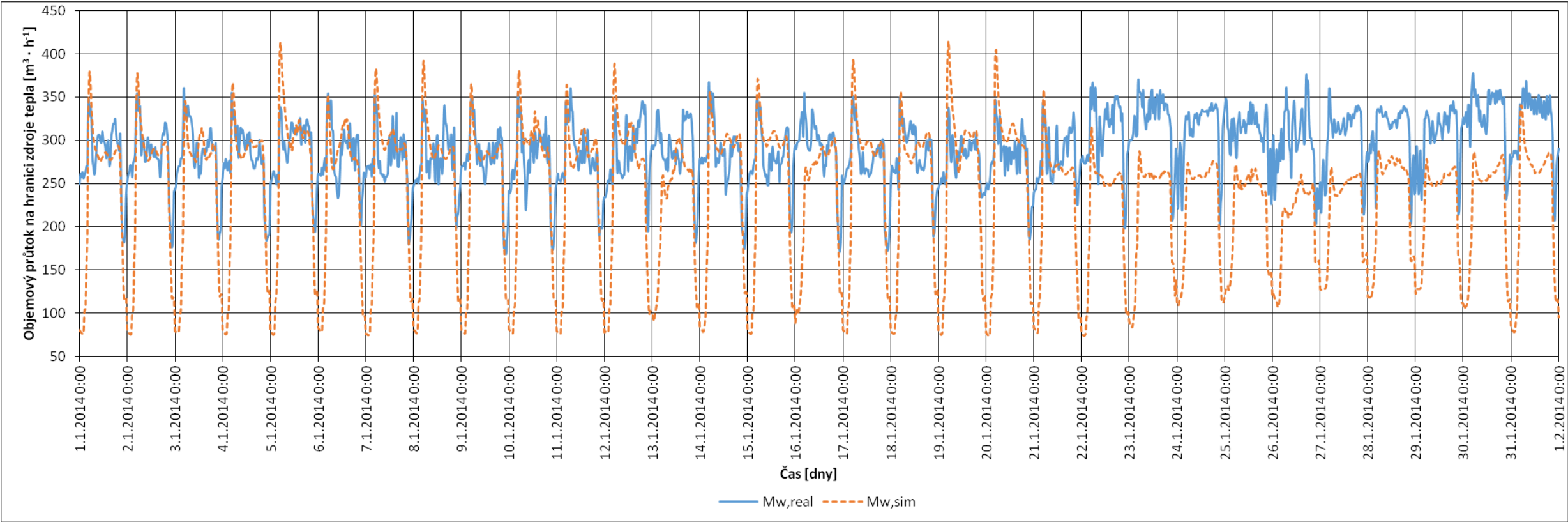
**P5a** - Varianta B2



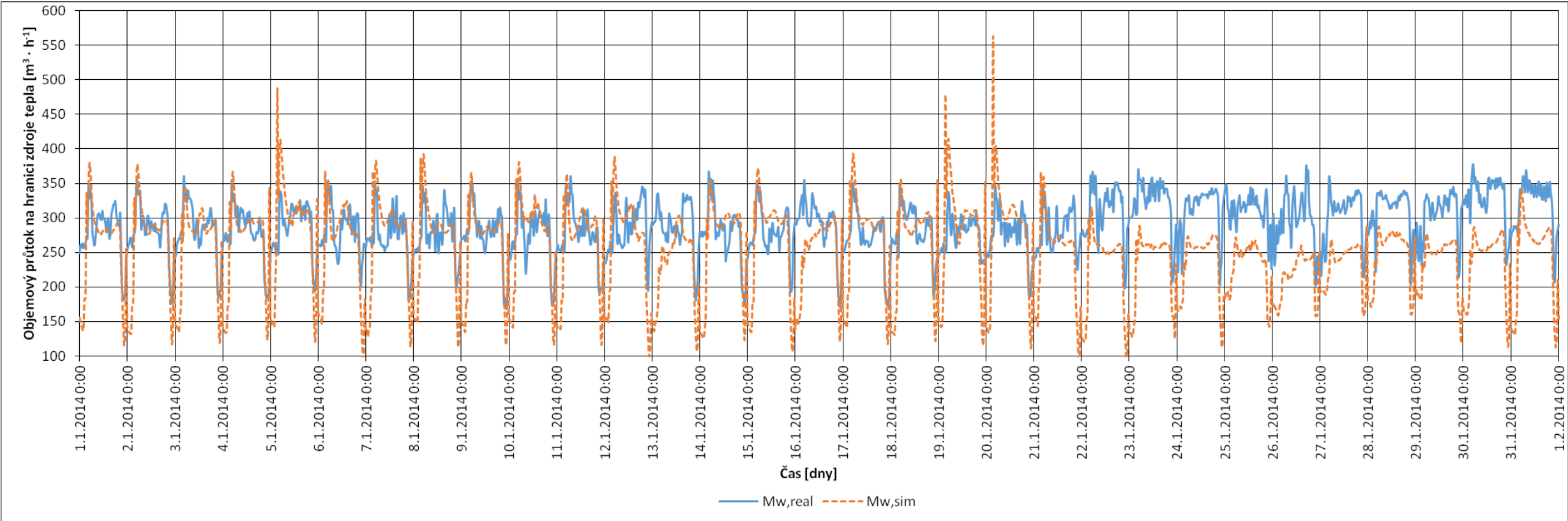
**P5b** - Varianta C2



**P6** - Skutečný a predikovaný průběh objemového průtoku na hranici zdroje tepla pro měsíc leden 2014



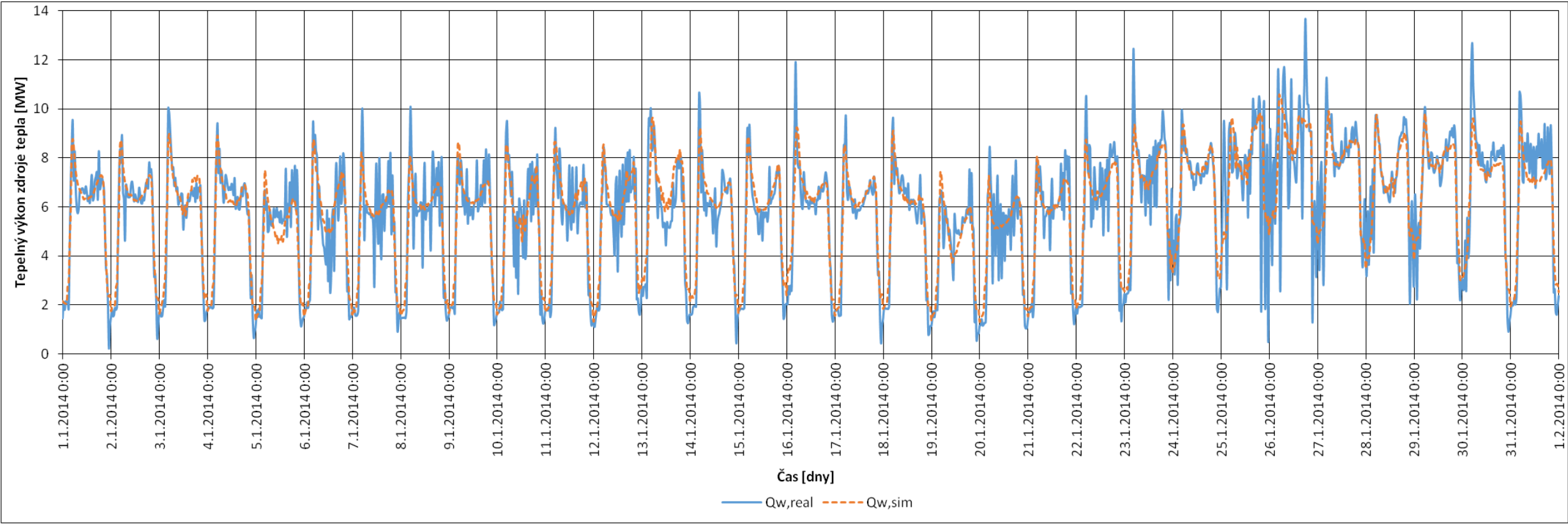
**P6a** - Varianta B2



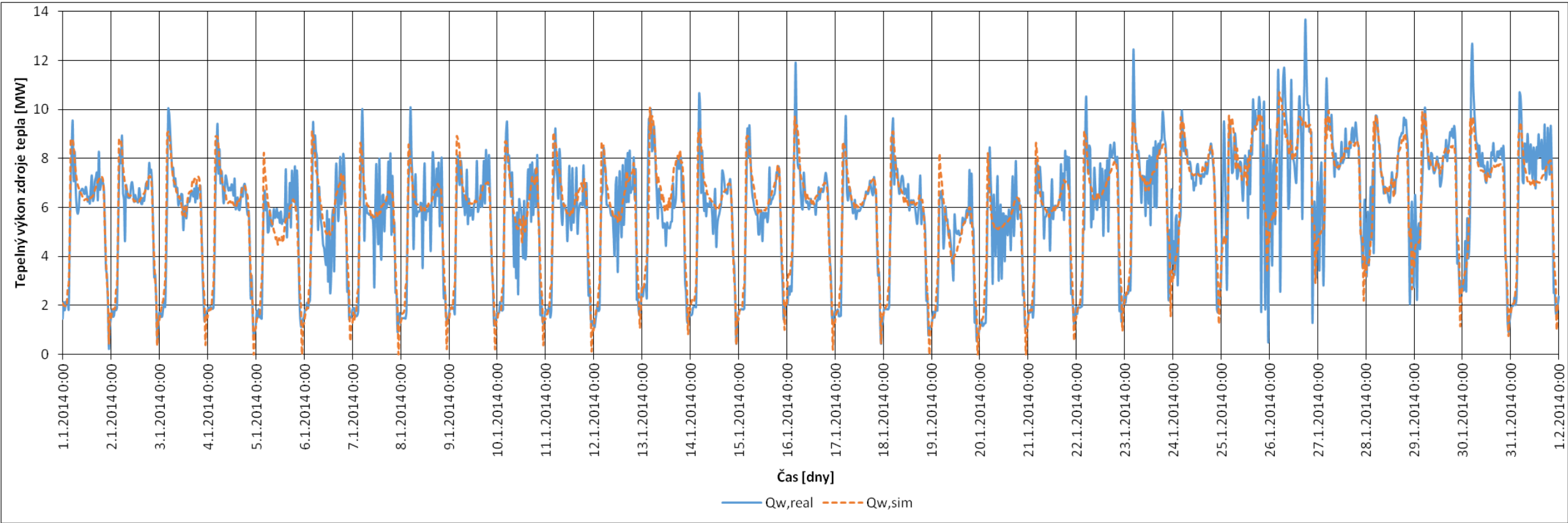
**P6b** - Varianta C2



**P7** - Skutečný a predikovaný průběh tepelného výkonu zdroje tepla pro měsíc leden 2014



**P7a** - Varianta B2



**P7b** - Varianta C2